

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Jelena Petruša

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Primjena hibridnih polimernih kompozita u automobilske industriji

Mentor:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Jelena Petruša

Zagreb, 2017.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Jelena Petruša** Mat. br.: 0035191096

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena hibridnih polimernih kompozita u automobilske industriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Polymer Hybrid Composites in Automotive Industry**

Opis zadatka:

Kompozitni materijali su kombinacija dva ili više materijala različitih svojstava koji daju materijal takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Postoje više vrsta kompozita, a najpoznatiji su polimerni kompoziti. Mnogobrojna odlična svojstva ovih materijala, niski troškovi te jednostavnost proizvodnje uvjetovali su veliko širenje područja njihove primjene.

Jedan od velikih potrošača polimernih kompozita je automobilska industrija jer polimerni kompoziti uz dobra mehanička svojstva imaju malu masu što utječe na bolju iskoristivost goriva. Zahtjevi koje polimerni kompoziti za primjenu u automobilima moraju ispunjavati uključuju trajnost, apsorpciju energije (prilikom udarca), smanjenje buke i vibracija te krutost te postojanost na koroziju. Polimerni kompoziti ojačani vlaknima zadovoljavaju sve navedene kriterije.

U radu je potrebno načiniti pregled polimernih kompozita koji se upotrebljavaju za izradu dijelova u automobilske industriji s naglaskom na primjenu polimernih materijala za izradu automobilske branika, postupaka izrade, zahtjeva koji se postavljaju na materijale te novih trendova na tom području.

Kada vozilo udari u pješaka ili neku prepreku potrebno je da branik apsorbira što veću energiju, tj. da raspoređivanje energije udarca bude po čitavoj površini kompozitne tvorevine. Kao dodatni materijali za apsorpciju udarca primjenjuju se različiti polimerni materijali. U ovom radu potrebno je provesti istraživanje koji materijal bi bio najpogodniji za što veću apsorpciju udarca.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je s odabranim postupkom prerade izraditi različite hibridne kompozitne ploče i ispitati sile udarca tj. kako primjena različitih hibridnih kompozitnih tvorevina s različitim debljinama i gustoćom dodatnog apsorbirajućeg materijala utječe na apsorpciju udarca.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Rok predaje rada: Predviđeni datum obrane:
11. svibnja 2017. 13. srpnja 2017. 19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Ana Pilipović
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Jelena Petruša

Zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović na ukazanom povjerenju, susretljivosti, te uloženom trudu i vremenu oko izrade ovog diplomskog rada. Neizmjereno sam Vam zahvalna što ste me uveli u svijet polimernih kompozita. Također, zahvaljujem se dr. sc. Petru Ilinčiću i doc. dr. sc. Zoranu Domitranu na ukazanoj pomoći oko izrade eksperimentalnog dijela ovog rada.

Želim zahvaliti svojim roditeljima na razumijevanju i potpori koju su mi pružili tijekom studiranja. Vaša bezuvjetna ljubav bila mi je neizmjereno potrebna, i uvijek će biti. Veliko hvala bratu Mihaelu i prijateljici Karli, bez vas ne bi nikad uspjela. Zahvaljujem svim svojim kolegama s fakulteta na potpori i ugodnom društvu tijekom studiranja. Hvala mojim prijateljicama i prijateljima na velikoj radosti i razumijevanju. Nadam se da ćete mi oprostiti izostanke s druženja. Hvala mom planinarskom suputniku na razumijevanju i vjeri da mogu ostvariti svoje snove. Hvala mom djedu koji više nije s nama. Ovaj rad posvećujem tebi.

Jelena Petruša

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.1. Svojstva kompozitnih materijala.....	2
2.2. Kompoziti s polimernom matricom ojačani vlaknima.....	4
3. POTREBA ZA PRIMJENOM POLIMERNIH KOMPOZITA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI.....	6
3.1. Statistički podaci o broju poginulih i ranjenih u prometnim nesrećama.....	8
4. SUSTAV BRANIKA NA AUTOMOBILIMA	10
4.1. Dijelovi branika.....	12
4.2. Princip rada sustava branika	14
4.3. Program za ocjenjivanje sigurnosti	16
5. POLIMERNI KOMPOZITNI MATERIJALI ZA IZRADU PREDNJEG BRANIKA AUTOMOBILA	20
5.1. Hibridni kompoziti.....	22
5.2. Materijali komponenata polimernih kompozita za izradu ispitnih ploča.....	24
5.2.1. Materijali matrice	24
5.2.2. Materijali vlakana	25
5.3. Postupci izrade polimernih kompozita za izradu ispitnih ploča	29
5.3.1. Ručni dodirni postupak laminiranja.....	29
5.3.2. Postupak izravnog prešanja.....	32
5.3.2.1. Hladno izravno prešanje	32
5.3.2.2. Toplo izravno prešanje.....	33
5.4. Pjena od poliuretana (PUR)	36
6. EKSPERIMENTALNI DIO	38
6.1. Uvod.....	38
6.2. Izrada ispitnih kompozitnih ploča.....	38
6.3. Svojstva poliuretanske pjene.....	51
6.4. Opis ispitivanja	52
6.5. Rezultati ispitivanja.....	57
6.6. Analiza rezultata ispitivanja.....	57
6.7. Optimiranje	65
6.8. Komentar provedenih ispitivanja	70

7. ZAKLJUČAK.....	74
8. LITERATURA	75
9. PRILOZI.....	79

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Dijagram naprezanje – istežanje vlaknima ojačanog kompozita [2].....	2
Slika 2.2.	Usporedba osnovnih tipova kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [2]	3
Slika 2.3.	Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [2]	5
Slika 3.1.	Upotreba polimernih materijala u automobilima [10].....	7
Slika 3.2.	Broj poginulih u prometnim nesrećama u Republici Hrvatskoj u razdoblju 2010-2016 [14, 15]	8
Slika 4.1.	Pet sustava branika [20]	11
Slika 4.2.	Prednji i stražnji metalni branik [20].....	12
Slika 4.3.	Polimerni odbojnik [21]	12
Slika 4.4.	Čelični branik [20].....	13
Slika 4.5.	Aluminijski branik [23]	13
Slika 4.6.	Model za apsorpciju udarne energije [7]	15
Slika 4.7.	Opće smjernice o razini sigurnosti automobila s obzirom na broj zvjezdica [25] ..	16
Slika 4.8.	Različiti udarači za testove sigurnosti pješaka [16]	17
Slika 4.9.	Udarač u obliku noge [20].....	18
Slika 4.10.	Kriteriji testa udaračem u obliku noge [20].....	19
Slika 5.1.	Vrste tkanja ojačavala [1].....	20
Slika 5.2.	Različiti način slaganja staklenih i ugljičnih vlakana u kompozitu [26].....	21
Slika 5.3.	Vrijednosti savojne čvrstoće za različita slaganja vlakana [26].....	21
Slika 5.4.	Različiti hibridni kompoziti: a) sloj po sloj različitih vrsta tkanja, b) tkanje sastavljeno od različitih vlakana, c) međusobno pomiješana različita vlakna [28]	22
Slika 5.5.	Različita hibridna tkanja: a) ugljik/aramid, b) aramid/staklo, c) ugljik/staklo [5,29]	23
Slika 5.6.	Umrežena poliesterska smola [5]	24
Slika 5.7.	Umrežena epoksidna smola [5]	25
Slika 5.8.	Staklena vlakna [32].....	26
Slika 5.9.	Proizvodnja ugljičnih vlakana [2]	27
Slika 5.10.	Ugljična vlakna [33].....	27
Slika 5.11.	Aramidna vlakna [35].....	28
Slika 5.12.	Ugljična vlakna u obliku običnog tkanja [5]	29
Slika 5.13.	Dodirni postupak laminiranja: 1 – otvoreni kalup, 2 – odvajalo, 3 – gelna prevlaka, 4 – ojačavalo, 5 – hladno očvršćujuća smola, 6 – gotov proizvod; a – nanošenje odvajala, gelne prevlake, ojačavala i smole, b – istiskivanje zraka između slojeva, c – odvajanje proizvoda od kalupa [5]	30
Slika 5.14.	Hladno izravno prešanje: a - nanošenje smole i ojačala, b - zatvaranje kalupa, c - konačni izradak; 1 - donja polovica kalupa, 2 - ojačalo, 3 - smola, 4 - gornja polovica kalupa, 5 - izradak [38].....	33
Slika 5.15.	a) Proizvodnja pločastih osmoljenih matova, b) pločasti osmoljeni matovi [36, 40].....	34
Slika 5.16.	a) Proizvodnja plastomera ojačanog staklenim matom, b) plastomer ojačan staklenim matom [36, 41].....	34
Slika 5.17.	a) Proizvodnja preprega, b) prepeg od ugljičnih vlakana [5, 36].....	35

Slika 5.18. Proizvodnja s pločastim osmoljenim listom [37]	35
Slika 5.19. Sinteza poliuretana, pri čemu uretanske grupe -NH-(C=O)-O- povezuju molekularne jedinice [42]	36
Slika 5.20. Pjena od poliuretana	37
Slika 6.1. Čelični branik automobila	39
Slika 6.2. Izrezana staklena i ugljična tkanja	42
Slika 6.3. Kalup za izravno prešanje	42
Slika 6.4. Priprema: a) poliesterske smole i umreživala, b) epoksidne smole i umreživala..	43
Slika 6.5. Izrada prve ploče: a) polaganje prvog sloja vlakana na donju polovicu kalupa, b) njegovo natapanje smolom	46
Slika 6.6. Izrada prve ploče: a) natopljen prvi sloj tkanja, b) polaganje drugog sloja tkanja	46
Slika 6.7. Izrada druge ploče: a) natapanje prvog sloja ugljičnih vlakana, b) natapanje petog sloja aramidnih vlakana	47
Slika 6.8. Izrada treće ploče: a) natapanje trećeg sloja vlakana, b) polaganje petog sloja ugljičnih vlakana	47
Slika 6.9. Izrada prve ploče: a) natopljen zadnji sloj staklenih vlakana, b) zatvaranje kalupa	48
Slika 6.10. Izrada ploča: a) natopljen zadnji sloj ugljičnih vlakana, b) natopljen zadnji sloj staklenih vlakana	48
Slika 6.11. Peć: a) kalup u unutrašnjosti peći, b) zatvorena peć	49
Slika 6.12. Ispitne ploče: a) prva ploča: staklena vlakna s poliesterskom smolom, b) druga ploča: ugljična i aramidna vlakna s epoksidnom smolom, c) treća ploča: ugljična i staklena vlakna s epoksidnom smolom	49
Slika 6.13. Poliuretanske pjene različitih gustoća i debljina upotrebljene u pokusu	51
Slika 6.14. Udarni uteg mase 2,64 kg	52
Slika 6.15. Postav za ispitivanje: a) shema postava, b) izrađen postav	53
Slika 6.16. Mjerno osjetilo <i>National Instruments NX 1305</i>	54
Slika 6.17. Program <i>Catman ver. 05</i>	55
Slika 6.18. Priprema ispitivanja	56
Slika 6.19. Završeno ispitivanje	56
Slika 6.20. Ovisnost sile za prvu ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene	60
Slika 6.21. Ovisnost sile za drugu ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene	62
Slika 6.22. Ovisnost sile za treću ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene	64
Slika 6.23. Ovisnost sile za prvu ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja	67
Slika 6.24. Ovisnost sile za drugu ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja	68
Slika 6.25. Ovisnost sile treću ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja	69
Slika 6.26. Usporedba rezultata sile F ispitnih na pločama bez poliuretanske pjene	70
Slika 6.27. Usporedba rezultata sile F ispitnih na pločama s upotrebom poliuretanske pjene gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm	71
Slika 6.28. Usporedba rezultata sile F ispitnih na pločama s upotrebom poliuretanske pjene gustoće 60 kg/m^3 i debljine 10 mm	72

POPIS TABLICA

Tablica 6.1. Svojstva upotrebljenih vlakana	41
Tablica 6.2. Raspored slaganja staklenih vlakana.....	44
Tablica 6.3. Raspored slaganja ugljičnih i aramidnih vlakana.....	44
Tablica 6.4. Raspored slaganja ugljičnih i staklenih vlakana	45
Tablica 6.5. Masa i debljina ispitnih kompozitnih ploča	50
Tablica 6.6. Svojstva poliuretanske pjene	51
Tablica 6.7. Faktorski plan pokusa.....	55
Tablica 6.8. Rezultati analize varijance za silu F na prvoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni	58
Tablica 6.9. Osnovni statistički podaci o modelu za silu F na prvoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni	59
Tablica 6.10. Rezultati analize varijance za silu F na drugoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni.....	61
Tablica 6.11. Osnovni statistički podaci o modelu za silu F na drugoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni	61
Tablica 6.12. Rezultati analize varijance za silu F na trećoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni	63
Tablica 6.13. Osnovni statistički podaci o modelu za silu F na trećoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni	64
Tablica 6.14. Uvjeti optimiranja za ispitivanje prve ispitne ploče i poliuretanske pjene	66
Tablica 6.15. Rješenje postupka optimiranja za ispitivanje prve ispitne ploče i poliuretanske pjene	66
Tablica 6.16. Uvjeti optimiranja za ispitivanje druge ispitne ploče i poliuretanske pjene.....	67
Tablica 6.17. Rješenje postupka optimiranja za ispitivanje druge ispitne ploče i poliuretanske pjene	68
Tablica 6.18. Uvjeti optimiranja za ispitivanje treće ispitne ploče i poliuretanske pjene.....	68
Tablica 6.19. Rješenje postupka optimiranja za ispitivanje treće ispitne ploče i poliuretanske pjene	69
Tablica 9.1. Rezultati ispitivanja: Staklena vlakna/poliesterska smola + poliuretanska pjena	80
Tablica 9.2. Rezultati ispitivanja: Ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena.....	81
Tablica 9.3. Rezultati ispitivanja: Ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena	82
Tablica 9.4. Rezultati ispitivanja: Staklena vlakna/poliesterska smola + poliuretanska pjena	83
Tablica 9.5. Rezultati ispitivanja: Ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena.....	84
Tablica 9.6. Rezultati ispitivanja: Ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena	85

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	m	širina branika
D	-	koeficijent prigušenja
d	-	funkcija poželjnosti
d	m	debljina branika
E	J	energija
F	N	sila
g	m/s ²	ubrzanje zemljine sile teže
h	m	visina
I	m ⁴	moment inercije
k	-	konstanta opruge
M	Nm	moment savijanja
m	kg	masa
r^2	-	koeficijent determiniranosti
R_m	N/m ²	rastezna čvrstoća
S	-	standardna devijacija

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
A	minimalna vrijednost odziva
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
ASA	akrilonitril/stiren/akrilat
B	točna vrijednost odziva
C	maksimalna vrijednost odziva
GMT	plastomer ojačan staklenim matom
MDS	mehanički sustav: masa – prigušivač - opruga
PA	poliamid
PA6,6	poliamid 6,6
PAN	poliakrilonitril
PBT	poli(butilen-tereftalat)
PC	polikarbonat
PE – LD	polietilen niske gustoće
PP	polipropilen
PS – E	pjeneći polistiren
PUR	poliuretan
SKO	suma kvadrata odstupanja
SMC	pločasti osmoljeni list

SAŽETAK

Kompozitni materijali danas se sve više razvijaju i primjenjuju u različitim industrijama zbog svojih mnogobrojnih prednosti. Automobilska industrija jedna je od velikih potrošača polimernih kompozita zbog toga što uz dobra mehanička svojstva imaju i malu masu što pozitivno utječe na ukupno smanjenje mase vozila i bolju iskoristivost goriva. Polimerni kompoziti zadovoljavaju potrebne zahtjeve u automobilskoj industriji kao što su trajnost, čvrstoća, krutost, postojanost prema koroziji, mogućnost apsorpcije energije, smanjenje vibracija i buke. Od polimernih se kompozita, kao zamjena za konvencionalne materijale, izrađuje automobilski branik koji ima važnu ulogu pri naletu automobila na neku prepreku ili pješaka. Uloga branika je da mora što bolje apsorbirati energiju udara kako ne bi došlo do oštećenja ostalih dijelova automobila, putnika i pješaka.

U radu je prikazana uloga branika u automobilima, opisani materijali i postupci prerade za proizvodnju kompozitnog branika. U eksperimentalnom dijelu rada izrađene su ispitne kompozitne ploče od različitih vrsta vlakana i smola. Provedeno je ispitivanje sile udarca na ispitne ploče primjenom dodatnog apsorbirajućeg materijala od polimerne pjene. Svrha ovog rada je ispitati kako primjena različitih kompozitnih tvorevina s različitim debljinama i gustoćama dodatnog apsorbirajućeg materijala utječe na apsorpciju udara.

Ključne riječi: apsorpcija energije udara, automobilska industrija, automobilski kompozitni branik, hibridni kompoziti, kompozitni materijali, polimerni kompoziti

SUMMARY

Composite materials are increasingly being developed and applied in different industries due to their many advantages. The auto industry is one of the major users of polymer composites because of their good mechanical properties along with a small mass that has a positive impact on total vehicle weight reduction and better fuel economy. Polymer composites meet the demands of the auto industry such as durability, strength, stiffness, corrosion resistance, energy absorption, vibration and noise reduction. Polymer composites, as a substitute for conventional materials, make a car bumper that plays an important role during car crashes with some obstacle or pedestrians. The bumper's role is that it has to absorb the shock energy more efficiently so as not to damage other parts of the car, the passengers or the pedestrians.

This thesis shows the role of bumper in cars, and the materials and processes for the production of a composite bumper are described. In the experimental part, test composite plates of different types of fibers and resins were made. Testing of the impact force on the test plates was conducted using an additional polymer foam absorbing material. The purpose of this thesis is to examine how the usage of different composite structures of different additional absorbent material thicknesses and densities affects the absorption of the impact.

Key words: auto industry, composite car bumper, composite materials, hybrid composites, impact energy absorption, polymer composites

1. UVOD

Posljednjih se godina kompozitni materijali sve više razvijaju i zamjenjuju konvencionalne materijale zbog potrebe za čvrstim i lakim konstrukcijama. Nastaju spajanjem dva različita materijala, matrice i ojačala, te tako omogućavaju postizanje različitih svojstava, lakšu izradu vrlo kompleksnih oblika koji su postojani na korozijsko djelovanje i dimenzijski stabilni pri ekstremnim uvjetima, jednostavni za održavanje, te imaju dulji vijek trajanja. Glavna prednost kompozitnih materijala je izvrstan odnos čvrstoće i gustoće, tzv. specifična čvrstoća koja im omogućava da postepeno zamjenjuju metalne materijale u primjeni.

Kompozitni materijali primjenjuju se u raznim područjima poput strojarstva, građevinarstva, brodogradnje, automobilske i zrakoplovne industrije, te sportu. Automobilska industrija veliki je potrošač kompozitni materijali, posebice polimernih kompozita. Oni zadovoljavaju potrebne zahtjeve u automobilske industrije kao što su trajnost, čvrstoća, krutost, postojanost prema koroziji, mogućnost apsorpcije energije, smanjenje vibracija i buke. Od polimernih kompozita izrađuju se karoserija, ovjes, dijelovi eksterijera (branik, poklopac motora, naplatak) i interijera (unutarnja vrata, armaturna ploča, školjka sjedala). [1]

U ovom diplomskom radu prezentirana je tema upotrebe polimernih kompozita u automobilske industrije, točnije u izradi prednjeg branika automobila. Uloga branika je da pri sudaru automobila apsorbira energiju udara kako bi spriječio ili smanjio učinjenu štetu na automobilu. Na taj način osigurana je zaštita vozača i ostalih putnika, te dijelova automobila kao što su motor, akumulator, sustav za hlađenje i grijanje. Također, pri naletu automobila na pješaka branik apsorbira energiju udara, te tako osigurava da pješak ne zadobije veće ozljede. Zbog toga su zahtjevi na materijal branika vrlo visoki. Polimerni kompoziti imaju izvrsnu kombinaciju svojstava, kao što su visoka specifična čvrstoća i specifična krutost, postojanost na koroziju, dinamička izdržljivost i niska gustoća, te su kao takvi idealni za materijal branika. Također, primjenom polimernih kompozita može se smanjiti ukupna masa automobila i time ostvariti bolja iskoristivost goriva, te smanjiti emisija ispušnih plinova.

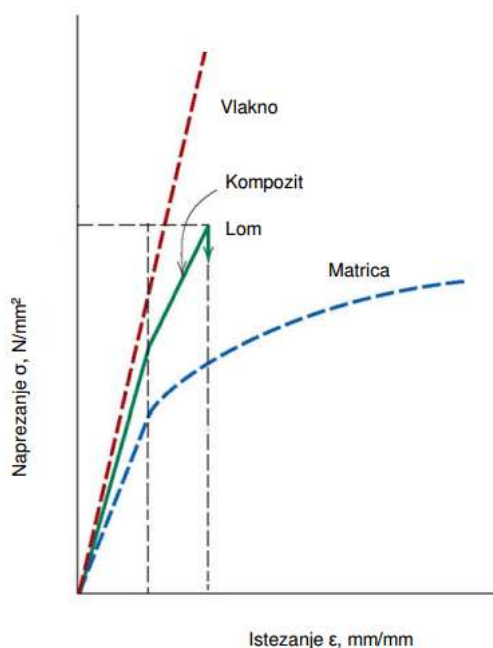
U prvom, teoretskom dijelu rada bit će prikazana uloga branika u automobilima, opisani materijali i postupci prerade za proizvodnju kompozitnog branika. U drugom će dijelu rada biti opisana izrada kompozitnih tvorevina, mjerenje sile udara i apsorpcije udarne energije u kompozitnu tvorevinu i poliuretansku pjenu različitih debljina i gustoća, te analiza rezultata.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Svojstva kompozitnih materijala

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. [2] Ta su svojstva negdje između svojstava komponenti, obično u skladu sa zakonom miješanja. No, neka svojstva, posebice čvrstoća, mogu se znatno poboljšati u odnosu prema vrijednostima koje imaju pojedine komponente kompozitnog materijala. Tako se kombinacijom volumnog udjela i položaja komponenti u kompozitu mogu stvarati materijali željenih, poboljšanih svojstava. [3]

Na slici 2.1 prikazan je dijagram naprezanje - istezanje vlaknima ojačanog kompozita. Jasno se može vidjeti kako dobiveni kompozit ima svojstva kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.

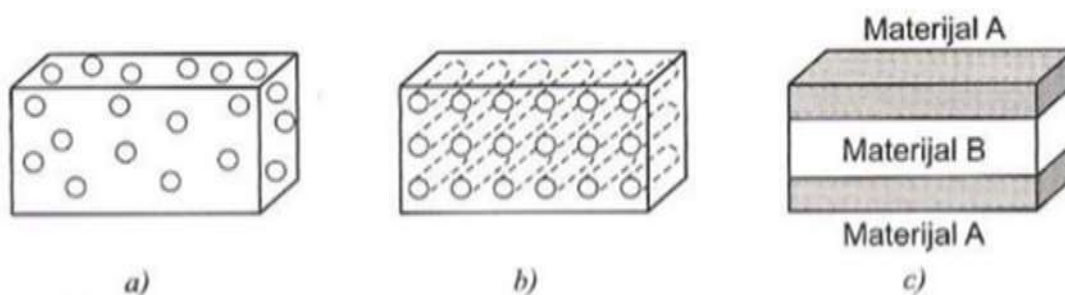


Slika 2.1. Dijagram naprezanje – istezanje vlaknima ojačanog kompozita [2]

U odnosu prema tradicionalnim materijalima kompoziti, a naročito polimerni kompoziti iskazuju brojne prednosti, kao što su postojanost na koroziju, mala gustoća i mala masa, povoljan odnos čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća), povoljan odnos modula elastičnosti i gustoće (specifična krutost), mogućnost proizvodnje dijelova složenog oblika, jednostavno

i jeftino održavanje, dulji vijek trajanja, mogućnost postizanja različite strukture i svojstava. [4]

Umjetno proizvedeni kompoziti sastoje se od matrice i ojačala. Na temelju materijala matrice kompozite dijelimo na metalne, keramičke i polimerne kompozite. Ojačalo ima odlučujući utjecaj na mehanička svojstva čitavog kompozita pa tako prema vrsti ojačala razlikujemo kompozite s česticama, vlaknima ojačani kompoziti, slojeviti kompoziti i sendvič kompoziti (kompozitne sendvič konstrukcije). Slojeviti kompoziti i sendvič kompoziti pripadaju skupini strukturnih kompozita. [5] Slika 2.2 prikazuje osnovne tipove kompozita prema obliku ojačala.



Slika 2.2. Usporedba osnovnih tipova kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [2]

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o: [2]

1. svojstvima matrice i ojačala,
2. veličini i rasporedu konstituenata,
3. volumnom udjelu konstituenata,
4. obliku konstituenata,
5. prirodi i jakosti veze između konstituenata.

Kompoziti imaju i nedostatke kao što su relativna krhkost, anizotropnost, visoki proizvodni troškovi kod velikih i složenih izradaka te problematičnost u vezi s tehnikama spajanja i konstrukcijskim oblikovanjem. [5]

2.2. Kompoziti s polimernom matricom ojačani vlaknima

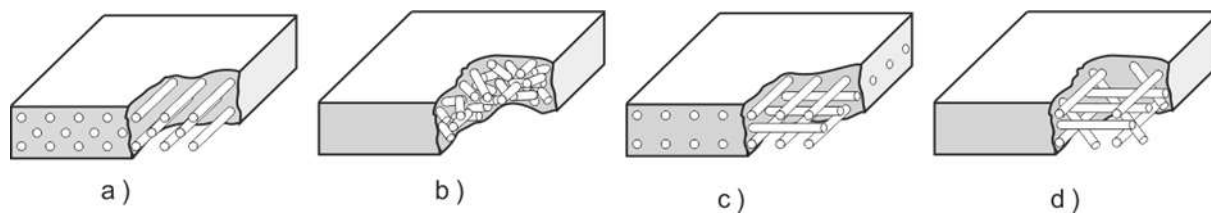
Kompoziti s polimernom matricom sastavljeni su od polimernog materijala kao matrice s vlaknima kao komponentom za ojačavanje. Materijal matrice treba biti žilav, duktilan i čvrst. Uloga matrice je da povezuje vlakna te da ih drži u pravilnom položaju i orijentaciji. Matrica nosi samo mali dio izvana nametnutog naprezanja, a ostatak prenosi i raspoređuje na vlakna. Vrlo je važno da matrica ne smije kemijski reagirati s vlaknima i da mora dobro prijanjati uz vlakna. Također, matrica mora zaštititi vlakna od okolnih utjecaja i oštećenja. Za polimerne matrice primjenjuju se duromeri i plastomeri. Najraširenije su poliesterske i epoksidne duromerne smole koje se upotrebljavaju u komercijalne i industrijske svrhe. Od plastomernih matrica primjenjuju se polipropilen, polietilen, poli(etilen-tereftalat), poli(butilen-tereftalat), poliamid, te visokotemperaturni plastomeri. [5]

Na osnovi promjera i karaktera vlakna su svrstana u tri skupine: viskeri, vlakna i žice. Viskeri su sićušni monokristali koji imaju ekstremno veliki omjer duljina/promjer. Vlakna su ili polikristalna ili amorfna te imaju mali promjer. Fine žice relativno su velikog promjera. Pri izradi polimernih kompozitnih materijala najčešće se upotrebljavaju vlakna. [2]

Vlakna se nazivaju i nosivi elementi kompozita jer osiguravaju visoku specifičnu čvrstoću, visoki specifični modul elastičnosti, žilavost te otpornost na trošenje. Vlakna moraju biti čvrsta, kruta, lagana te moraju imati visoko talište. Zbog toga se za vlakna preferiraju materijali visoke specifične čvrstoće i visoke specifične krutosti. [5]

Najvažniji faktori kod konstruiranja vlaknima ojačanih kompozita su omjer duljine i promjera vlakana, volumni udio vlakana te usmjerenost vlakana. Kontinuirana vlakna daju bolja svojstva od diskontinuiranih vlakana, ali se često teško proizvode i ugrađuju u matricu. Veći volumni udio vlakana vodi do povišenja čvrstoće i krutosti kompozita. Gornja granica od oko 40 % određena je sposobnošću, odnosno mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice. Usmjerenost vlakana i način njihova slaganja bitno utječe na svojstva kompozitnog materijala. U slučaju kontinuiranih usmjerenih vlakana, mehanička svojstva kompozita su anizotropna tako da je čvrstoća najviša u smjeru vlakana, dok je u okomitom smjeru najniža. Vlakna se zbog toga mogu polagati pod određenim kutevima čime se postižu jednoličnija svojstva kompozita. [5]

Na slici 2.3 prikazani su različiti načini usmjerenosti vlakana.



Slika 2.3. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [2]

Anizotropija nije uvijek nepoželjna jer se nosivost konstrukcije može bitno povećati projektiranjem takve strukture kompozita koja osigurava lokalno višu čvrstoću i krutost tamo gdje je to najpotrebnije. [3]

Najčešće upotrebljavana vlakna za polimerne kompozite su staklena, ugljična i aramidna vlakna, te njihove kombinacije. Izbor vlakana temelji se na zahtjevima iz primjene (specifični modul, specifična čvrstoća, žilavost, radna temperatura, itd.).

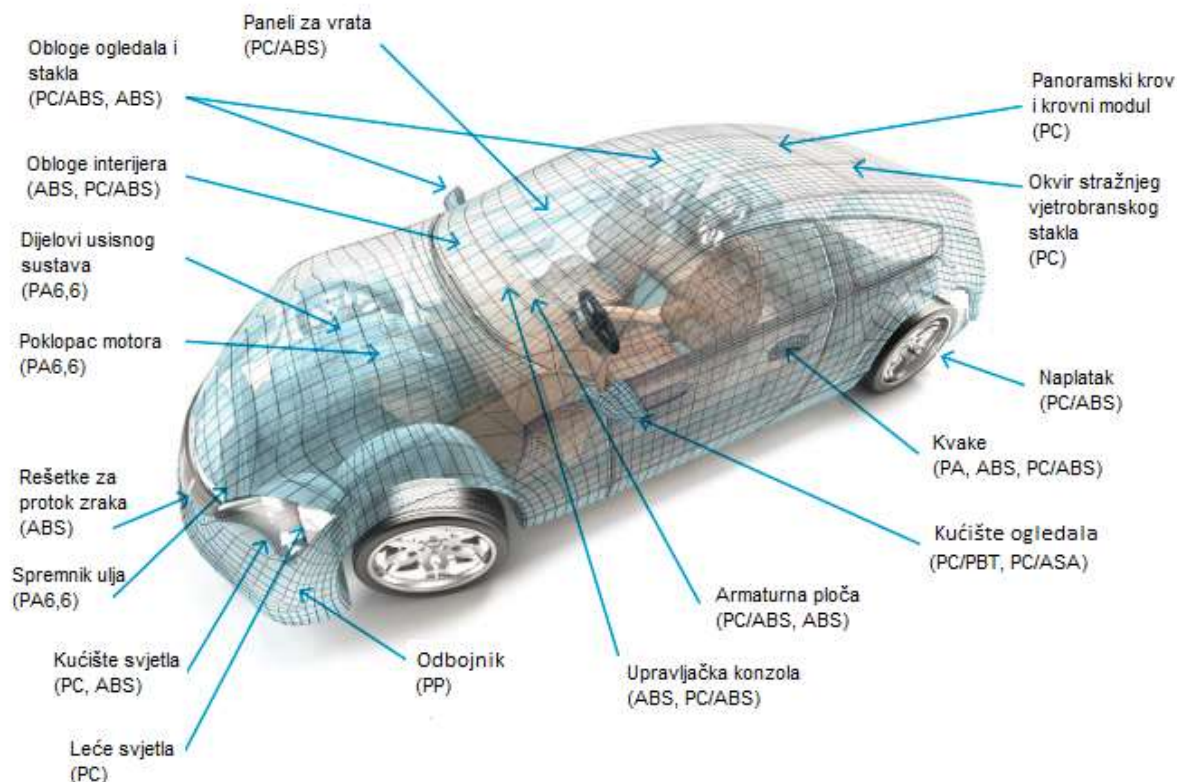
3. POTREBA ZA PRIMJENOM POLIMERNIH KOMPOZITA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

Automobilska industrija jedna je od najvećih i najvažnijih industrija u svijetu. U svoj razvoj uključuje mnoge kompanije velikih razmjera, te tako utječe na svjetski ekonomski i gospodarski razvoj. Svaka kompanija ima cilj unaprijediti svoje proizvode te tako postići konkurentsku prednost i ekonomsku profitabilnost. Automobilska industrija svakim se danom sve više razvija kako bi osigurala potrebnu razinu sigurnosti i udobnosti putnika. Istraživanja i razvoj usmjerena su na konstrukciju i pronalazak novih, boljih materijala. Različiti zahtjevi kao što su to visoka čvrstoća, krutost, dinamička izdržljivost, postojanost prema koroziji, apsorpcija udarne energije, manja masa, smanjenje buke i vibracije, traže pronalazak materijala koji imaju određena mehanička, kemijska i fizikalna svojstva.

Također, učinkovita iskoristivost goriva i regulacija ispušnih plinova automobila danas predstavljaju važna pitanja. Najbolji način da se poveća učinkovita iskoristivost goriva, a da se pritom ne smanjuje razina sigurnosti, je primjena vlaknima ojačanih kompozitnih materijala u automobilima. [6] Na taj se način osigurava izrada lakih i čvrstih konstrukcija koje zadovoljavaju postavljene zahtjeve. Svjetska automobilska stopa proizvodnje je u porastu, a procjenjuje se do 76 milijuna automobila godišnje do 2020. godine. U bliskoj budućnosti ograničeni izvori nafte povećat će cijenu proizvoda koji upotrebljavaju naftu. Procjenjuje se da je smanjenje mase automobila za 25 % gotovo jednako uštedi od 250 milijuna barela sirove nafte. [7] Smanjenje mase ima pozitivan utjecaj na potrošnju goriva automobila te time smanjuje i cjelokupnu emisiju vozila. Koncept održivosti je veoma kompleksan jer je činjenica da se upotrebljavaju materijali koji iziskuju mnogo energije u njihovoj proizvodnji, ali također uzima se u obzir prednost koju imaju ti materijali u vidu smanjenja emisija i povećanja sigurnosti. [5]

Primjena kompozitnih polimernih materijala danas je veoma raširena u automobilskoj industriji zahvaljujući svojim mnogim pozitivnim svojstvima. Slika 3.1 prikazuje upotrebu polimernih materijala u automobilima. Upotreba kompozitnih materijala označava kompetitivnu prednost proizvođača. Ugljična vlakna su, po prvi put, primijenjena u svrhu izrade šasije vozila na natjecanju *Formule 1* 1981. godine. [8] Ušteda na masi u odnosu na uobičajenu, čeličnu šasiju bila je značajna i na koncu donijela prevagu u natjecanju.

Smanjenje mase je jedno od prioriteta konstruktora vozila. Smanjenjem mase omogućuju se mnogo bolja dinamička vozna svojstva vozila. Za pomicanje predmeta manje mase potrebna je manja sila. Nadalje, spuštanje težišta vozila pridonosi dinamičkim svojstvima. [5] Procijenjeno je da ušteda mase od 20 kg donosi 0,4 s po krugu tipične *Grand Prix* staze natjecanja F1. [9]



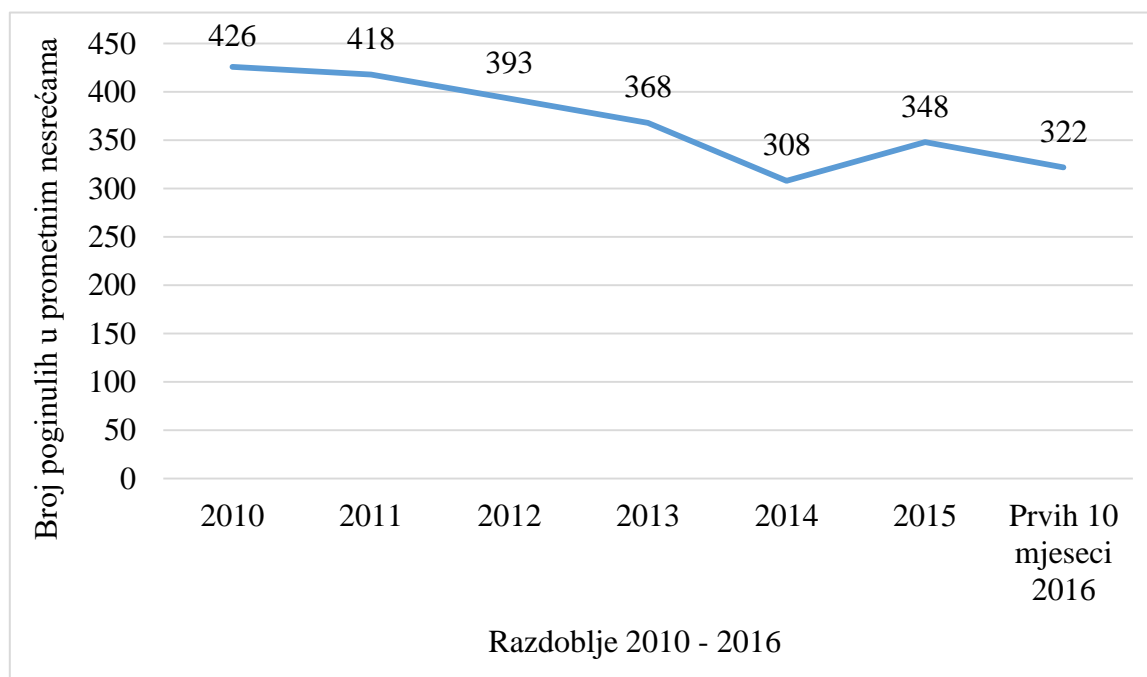
Slika 3.1. Upotreba polimernih materijala u automobilima [10]

Upotreba kompozitnih materijala u automobilskoj industriji omogućuje ispunjenje traženih zahtjeva, a da pritom ne smanjuje razinu sigurnosti i udobnosti putnika. Upravo zbog te sigurnosti, istraživanja i ulaganja u razvoj usmjerena su na još jednu ključnu stavku automobila, a to je konstrukcija. U skladu s time, konstrukcija sustava automobilskih branika veoma je važna. Sustav branika je konstruiran s ciljem da apsorbira 80 % kinetičke energije tijekom sudara. Razvojem konstrukcije kompozitnog sustava branika povećat će se učinkovitost branika, kapacitet apsorpcije udarne energije, smanjit će se ukupna masa automobila, potrošnja goriva i emisije ispušnih plinova, te će se povećati zaštita putnika i dijelova automobila. [11]

3.1. Statistički podaci o broju poginulih i ranjenih u prometnim nesrećama

Prometne nesreće u svijetu događaju se svakim danom sve više, a broj stradalih i ranjenih je u porastu. Kolizija između pješaka i cestovnih vozila predstavlja glavni problem za javno zdravstvo i sigurnost. Više od trećine 1,2 milijuna ljudi smrtno stradalih i 10 milijuna ozlijeđenih u cestovnom prometu su pješaci. [12] Pješaci zauzimaju 12 – 35 % smrtno stradalih ili ranjenih u svim prometnim nesrećama, a samo 4 – 8 % prometnih nesreća uključuje pješake. [13]

Protekle godine situacija u Republici Hrvatskoj ipak je bila nešto bolja. Prema podacima Ministarstva unutarnjih poslova 2016. godine broj poginulih u prometu u prvih deset mjeseci manji je u odnosu na 2015. godinu za 26 odnosno 9 %. Istovremeno broj teško ozlijeđenih smanjen je za 43 odnosno 1,8 %, a lakše ozlijeđenih za 270 odnosno 2,6 %. [14] Slika 3.2 prikazuje broj poginulih u prometnim nesrećama u Republici Hrvatskoj u razdoblju 2010 - 2016.



Slika 3.2. Broj poginulih u prometnim nesrećama u Republici Hrvatskoj u razdoblju 2010-2016 [14, 15]

Prema vrstama prometnih nesreća najviše osoba poginulo je u sudarima iz suprotnih smjerova, na drugom su mjestu slijetanja s ceste, a nakon toga nalet na pješake te bočni sudari. U prvih deset mjeseci 2016. godine poginulo je dvoje djece i to kao pješaci. [14]

Na temelju tih podataka može se zaključiti da su svijetu nužno potrebne sigurnosne mjere, edukacija vozača, ali i istraživanja u cilju napredovanja automobilske industrije koja će doprinijeti smanjenju smrtno stradalih i ranjenih u prometnim nesrećama. Kod odrasle osobe najčešće ozljede u prometnim nesrećama su ozljede glave i donjih udova. Zbog toga vjetrobransko staklo i prednji branik automobila predstavljaju glavne izvore ozljeda pješaka. Sustav branika je komponenta automobila koja ima prvi kontakt s pješakom, pa je njena glavna uloga apsorpcija energije udara kako bi prigušila energiju i smanjila ozljede pješaka. [16] Također, na taj se način može spriječiti ili smanjiti učinjena šteta na automobilu, te osigurati zaštita vozača i ostalih putnika.

Rizik da pješaci nastradaju u sudaru s automobilom ovisi o nekoliko parametara, kao što su brzina i smjer kretanja automobila, te karakteristike konstrukcije automobila. [17]

4. SUSTAV BRANIKA NA AUTOMOBILIMA

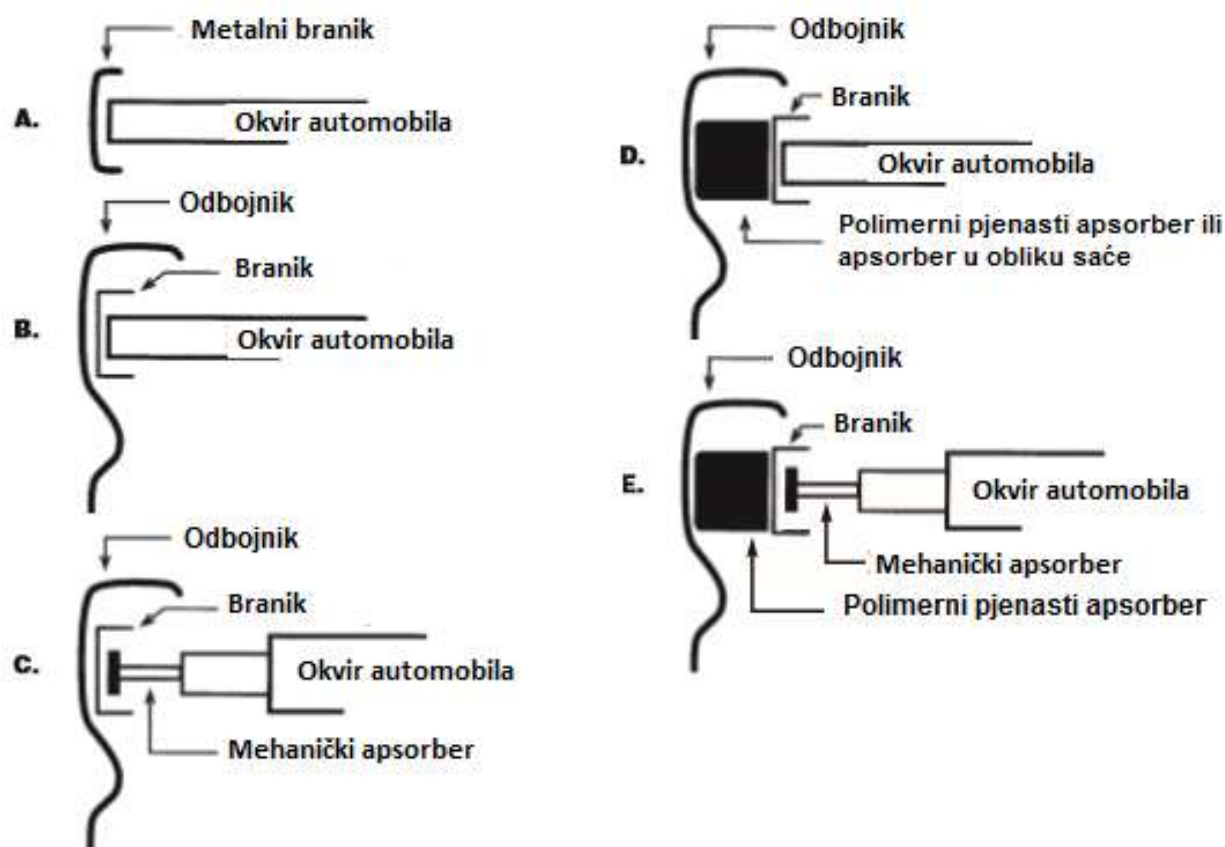
Branici su pričvršćeni za prednji i stražnji dio automobila i služe kao njegova zaštita. Oni smanjuju efekt kolizije s drugim automobilima i objektima zbog svoje velike deformacijske zone. Branici su konstruirani i oblikovani kako bi sami sebe deformirali i apsorbirali sile (kinetička energija) tijekom sudara. [18]

Prilikom razvoja sustava branika na automobilima, inženjeri moraju u obzir uzeti nekoliko važnih čimbenika. Najvažniji čimbenici su što veća mogućnost apsorpiranja energije udara u udarnim zonama, visoka čvrstoća, niska gustoća, odnosno visoka specifična čvrstoća, postojanost prema koroziji, tehnologičnost, jednostavna proizvodnja u velikim količinama, niski troškovi proizvodnje, te recikličnost. [19]

Važnu ulogu ima i odabir materijala sustava branika kako bi se postigla ravnoteža između krutosti, čvrstoće i apsorpcije energije. Krutost i apsorpcija energije su bitni kriteriji. Krutost je važna zbog toga što konstrukcija automobila ograničava deformacijski prostor branika pri udaru. Apsorpcija energije važna je zbog toga što branik mora apsorbirati udarnu energiju i spriječiti njen prelazak na ostatak automobila. [19]

Postoji pet sustava branika koji se danas najviše primjenjuju (slika 4.1): [20]

- A. metalni branik,
- B. polimerni odbojnik i branik,
- C. polimerni odbojnik, branik i mehanički apsorber energije,
- D. polimerni odbojnik, branik i polimerni pjenasti apsorber ili apsorber energije u obliku saća,
- E. polimerni odbojnik, branik, polimerni pjenasti apsorber i mehanički apsorber energije.



Slika 4.1. Pet sustava branika [20]

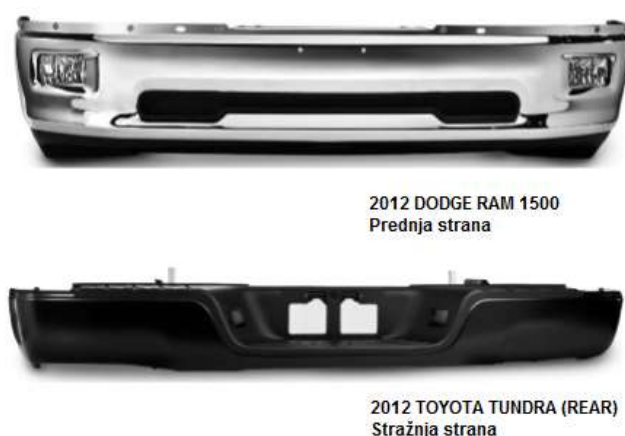
Sustav metalnog branika (slika 4.1.a) sastoji se samo od metalnog branika koji je pričvršćen na prednji ili stražnji dio automobila. Metalni branik djeluje kao primarni apsorber energije udara u sportskim i kombi vozilima. [20]

Sustav polimerni odbojnik i branik (slika 4.1.b) može se primijeniti samo na stražnjem djelu automobila zbog toga što su zahtjevi za sigurnost manji nego na prednjem djelu. [20]

Sustav polimerni odbojnik, branik i apsorberi energije najčešći je oblik sustava branika (slika 4.1.c, d, e), te se primjenjuje na prednjem i na stražnjem djelu automobila. Branik apsorbera najveći dio udarne energije, a preostali dio mogu apsorbirati mehanički apsorberi energije, polimerni pjenasti apsorberi energije ili saće. [20]

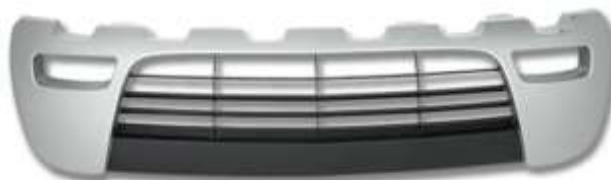
4.1. Dijelovi branika

Metalni branik najčešće se izrađuje od čelika postupcima deformiranja, kovanjem i valjanjem. Na njemu se obično nalaze razne polimerne prevlake, prevlake od nehrđajućeg čelika ili kroma radi zaštite od korozije. [20] Slika 4.2 prikazuje prednji i stražnji metalni branik.



Slika 4.2. Prednji i stražnji metalni branik [20]

Odbojnik se obično primjenjuje za estetiku i za smanjenje aerodinamičkih otpora sile. Također, kontrolira protok zraka oko automobila i količinu zraka koja ulazi u prednji dio automobila, odnosno oko prostora gdje se nalazi motor. Fleksibilan je i ne može smanjiti udarnu energiju, pa se smatra nestrukturalnom komponentom. Odbojnik se izrađuje od polipropilena (PP), poliuretana (PUR) ili polikarbonata (PC) postupcima injekcijskog prešanja. Uobičajeno se sastoji od puno linija i grebena te tako utječu na estetski dojam vozila. [7, 20] Slika 4.3 prikazuje polimerni odbojnik.



Slika 4.3. Polimerni odbojnik [21]

Branik je ključna struktura koja pomaže apsorbirati kinetičku energiju u sudarima s visokom udarnom energijom, te pruža otpor na savijanje u sudarima s niskom udarnom energijom, pa je stoga branik strukturalna komponenta. [7] Na taj način branik sprječava oštećenje ostatka automobila ili smanjuje njegovu štetu.

Branik je zakrivljena ploča koja se izrađuju od konvencionalnih materijala kao što su čelik i aluminij. Na slici 4.4 prikazan je čelični branik, a na slici 4.5 aluminijski. Čelik i aluminij su lako dostupni, lako obradljivi, jeftini, mogu se popraviti postupcima deformiranja, te se mogu reciklirati. Branik od čelika ima dobru nosivost opterećenja, ali njegov najveći nedostatak je velika masa. Upravo je to razlog zbog kojeg se istraživanja fokusiraju na razvoj branika od kompozitnih materijala, koji osim male mase imaju i drugi niz prednosti. Konstrukcija kompozitnih branika treba osigurati stabilno, kontinuirano i kontrolirano rasipanje kinetičke energije kako bi se smanjila njena brzina propagiranja. [22]



Slika 4.4. Čelični branik [20]



Slika 4.5. Aluminijski branik [23]

Apsorberi energije konstruirani su da apsorbiraju dio udarne energije pri sudaru automobila. Iznimno su učinkoviti pri sudarima s niskom udarnom energijom zbog toga što ih opruge mogu vratiti u početni položaj. Postoje različiti oblici apsorbera energije kao što su to mehanički apsorberi, polimerni pjenasti apsorberi ili saće. Svi polimerni pjenasti apsorberi i saće izrađuju se od polipropilena (PP), poliuretana (PUR), polietilena niske gustoće (PE-LD), te pjenećeg polistirena (PS-E). Mehanički apsorberi energije izrađuju se od metala i ponekad nalikuju na amortizere. Iako imaju veću masu od polimernih pjenastih apsorbera i saća, mehanički apsorberi mogu apsorbirati veću količinu udarne energije. [20]

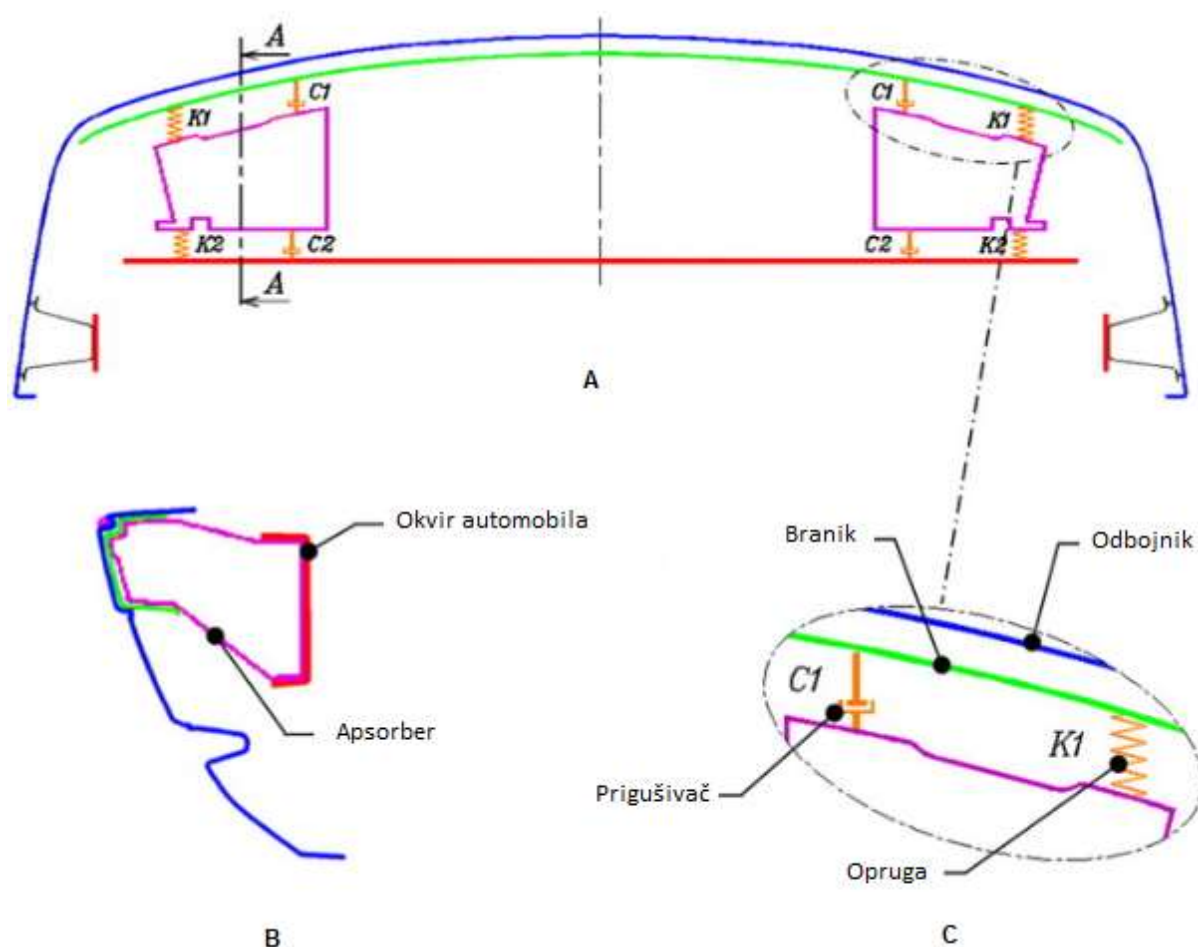
Ako je automobil male mase (manje od 1,2 tone) i ima nisku cijenu, te ne zahtijeva visoku učinkovitost, branik se primjenjuje s polimernim pjenastim apsorberom energije koji mu pruža potporu i zamjenjuje skupe apsorbere. [24]

4.2. Princip rada sustava branika

Sustav branika, kako na prednjem tako i na stražnjem dijelu automobila, odgovoran je za sprečavanje propagacije energije udara u ostali dio automobila. Na taj način sprječava ili umanjuje štetu na automobilu, štiti prtljažnik, gorivo, poklopac motora, ispušni i rashladni sustav, prednja i stražnja svjetla, te štiti vozača i putnike. [6]

Pri sudarima s niskom udarnom energijom progib branika i apsorbera energije je u njihovom elastičnom području te ima glavnu ulogu u prigušenju udarne energije. Ako kod sudara s visokom udarnom energijom progib branika ne može prevladati zadano opterećenje dolazi do njegovog loma. Pri tom apsorberi energije ne mogu sami prigušiti višak visokog opterećenja, pa se preostala sila udara apsorbira uz pomoć deformacije prednjeg glavnog okvira automobila. [7] Odnosno dolazi do oštećenja prednjeg djela automobila, što je nepoželjno.

Kod ispitivanja sudara s niskom udarnom energijom apsorberi energije koji se nalaze na oba kraja branika, zajedno s otporom branika na savijanje sudjeluju u procesu prigušivanja. [7] Slika 4.6.a prikazuje uzdužni presjek pojednostavljenog modela za apsorpciju udarne energije. Branik je pričvršćen za glavni okvir automobila uz pomoć dva ista apsorbera energije koji djeluju istovremeno (slika 4.6.b).



Slika 4.6. Model za apsorpciju udarne energije [7]






Otpornost na savijanje branika i apsorberi energije djeluju zajedno kao linearni mehanički MDS (masa – prigušivač – opruga) sustav koji sudjeluje u procesu apsorpcije udarne energije u svom elastičnom području. Ukupni iznos progiba ovisi o konstanti opruge (k), a ukupni iznos apsorpcije energije ovisi o koeficijentu prigušenja (D). U stvarnosti oba parametra nisu konstantna u svojim elastičnim područjima (slika 4.6.c). Apsorberi uobičajeno imaju nižu krutost pa djeluju pri sudarima s niskom energijom udara, dok branik ima višu krutost za prigušivanje viška opterećenja. Ukoliko opterećenje udara nadilazi elastično područje prigušivanja, apsorberi energije prelaze u plastično područje, što dovodi do gnječenja. [8]

4.3. Program za ocjenjivanje sigurnosti

U većini zemalja svijeta sustav branika je obavezan na svim vozilima, a njegova konstrukcija mora zadovoljiti sigurnosne mjere koje su uvjetovane međunarodnim regulacijama i programima.

EuroNCAP je Europski program za ocjenjivanje sigurnosti novih automobila (e. *European New Car Assessment Programme*). *EuroNCAP* primjenjuje sigurnosni sustav ocjenjivanja od pet zvjezdica kako bi pomogao svojim korisnicima lakše identificirati najsigurniji izbor automobila za njihove potrebe. Također, njihov je cilj motivirati proizvođače automobila na poboljšanje razine sigurnosti kako bi se smanjio broj ranjenih putnika. [25]

Ocjena sigurnosti određuje se iz niza testova koji predstavljaju na pojednostavljen način važne scenarije nesreća u realnom svijetu, a koji bi mogli dovesti do ozlijeđenih ili poginulih putnika u automobilu ili drugih sudionika u prometu. Broj zvjezdica pokazuje koliko dobro je automobil zadovoljio *EuroNCAP* testove, ali i kakvu sigurnosnu opremu su proizvođači ponudili na tržištu. Pa prema tome najviši broj zvjezdica pokazuje da je automobil dobro prošao na testovima te da je sigurnosna oprema lako dostupna korisnicima u Europi. Oni automobili koji se ocjene s najnižom zvjezdicom nisu nužno nesigurni za upotrebu, već to znači da su manje sigurni u odnosu na konkurenciju. [25] Neke od općih smjernica o razini sigurnosti automobila s obzirom na broj zvjezdica su prikazane na slici 4.7.

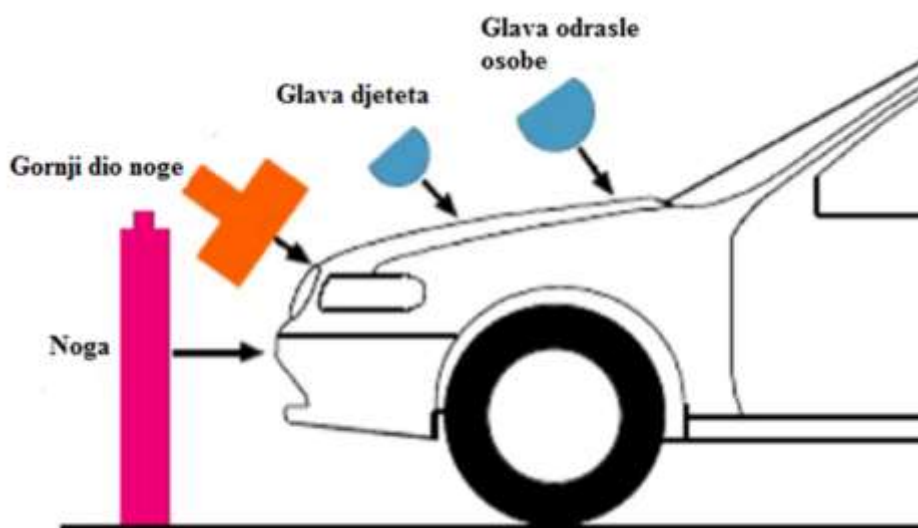
	5 zvjezdica: cjelokupni dobri rezultati u zaštiti prilikom nesreća; dobro opremljen s robusnom tehnologijom za izbjegavanje sudara
	4 zvjezdice: cjelokupni dobri rezultati u zaštiti prilikom nesreća; može se ugraditi dodatna tehnologija za izbjegavanje sudara
	3 zvjezdice: prosjek za dobru zaštitu putnika prilikom nesreća; nedostaje tehnologija za izbjegavanje sudara
	2 zvjezdice: nominalna zaštita prilikom nesreća; nedostaje tehnologija za izbjegavanje sudara
	1 zvjezdica: granična zaštita prilikom nesreća

Slika 4.7. Opće smjernice o razini sigurnosti automobila s obzirom na broj zvjezdica [25]

EuroNCAP provodi program ocjenjivanja sigurnosti pješaka u prometu. Program se sastoji od tri testa: [20]

- udar noge u branik uz pomoć udarača u obliku noge (e. *leg-form impactor*),
- udar gornjeg dijela noge u rub poklopca motora uz pomoć udarača u obliku gornjeg dijela noge (e. *upper leg-form impactor*),
- udar glave u vrh poklopca motora uz pomoć dva različita udarača u obliku glave (e. *head-form impactors*).

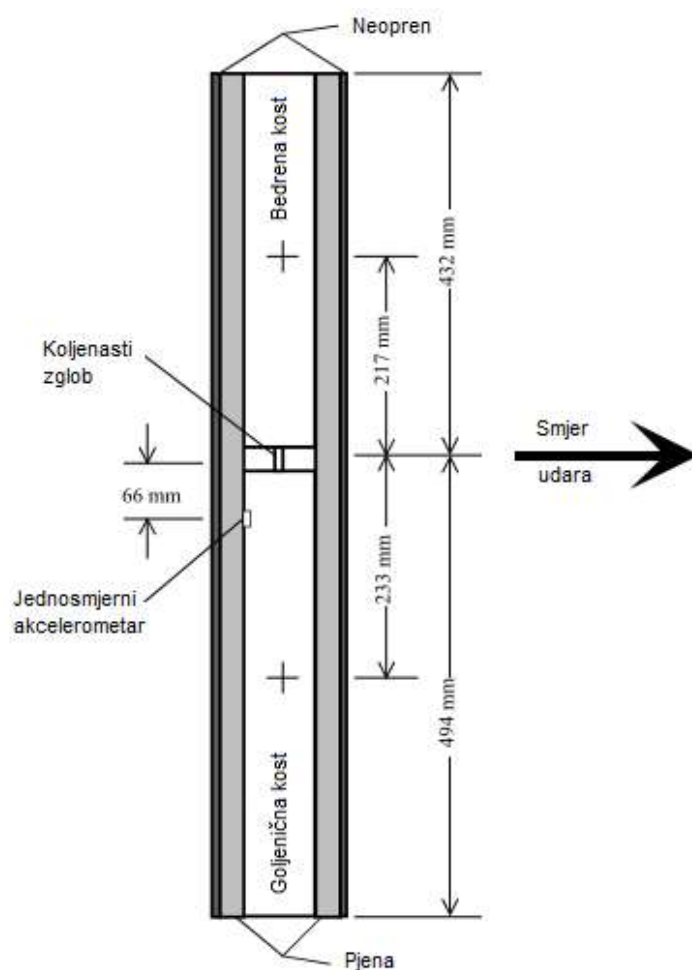
Udarač u obliku noge predstavlja donji ud odrasle osobe prilikom udara u branik kako bi se identificirao smični pomak i kut savijanja zgloba koljena u bočnom smjeru, te ubrzanje goljenične kosti. Udarač u obliku gornjeg dijela noge predstavlja gornji dio noge odrasle osobe i zdjelicu kako bi se identificirali momenti savijanja i sile uzrokovane udarom u rub poklopca motora. Udarač u obliku glave može biti u dvije različite veličine, jedna predstavlja glavu djeteta, a druga glavu odrasle osobe. Udarač služi kako bi se identificiralo ubrzanje glave pri udaru u vrh poklopca motora. [16] Slika 4.8 prikazuje različite udarače koji se upotrebljavaju u programu ocjenjivanja sigurnosti pješaka u prometu.



Slika 4.8. Različiti udarači za testove sigurnosti pješaka [16]

U ovom radu fokus je na testu udara noge u branik uz pomoć udarača u obliku noge zbog toga što je ozljeda noge pješaka najčešća vrsta ozljede u udarima s automobilima. Svrha tog testa je smanjenje broja i vrsta ozljeda noge pješaka. Najčešće ozljede su frakture kostiju unutar zgloba, puknuće ligamenata i višestruku prijelomi. U ovom testu udarač u obliku noge usmjeren je prema stacionarnom vozilu uzdužnom brzinom od 40 km/h paralelno s uzdužnom osi vozila. Test može biti izveden na bilo kojem mjestu uzduž lica vozila, te rubu branika ograničenom s kutem od 30° sa svake strane. [16]

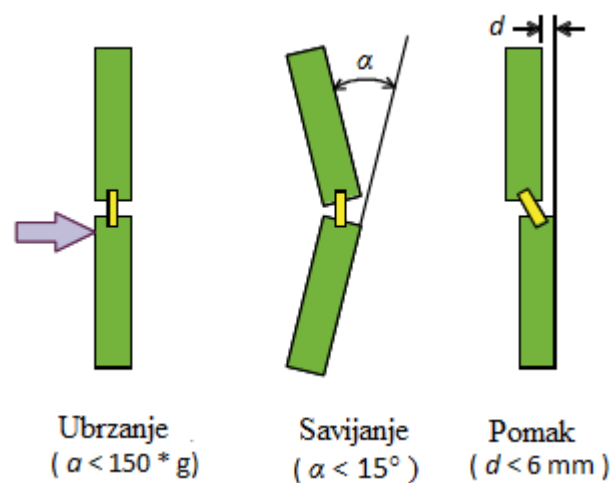
Udarač u obliku noge sastoji se od dva polukruta valjka promjera 70 mm. Niži valjak predstavlja goljeničnu kost, a viši bedrenu kost pješaka. Valjci su povezani s deformabilnim dijelom koji predstavlja koljenasti zglob. Cijela konstrukcija omotana je pjenom debljine 25 mm, te neoprenom debljine 6 mm. Slika 4.9 prikazuje udarač u obliku noge. [20]



Slika 4.9. Udarac u obliku noge [20]

Test je zadovoljen ukoliko su ispunjeni svi kriteriji testa, koji određuju ponašanje pješakove noge prilikom sudara (slika 4.10): [20]

- kut savijanja koljena mora biti $< 15^\circ$,
- smični pomak koljena mora biti $< 6 \text{ mm}$
- ubrzanje goljenične kosti mora biti $< 150 \cdot g$ (ubrzanje zemljine sile teže $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$).



Slika 4.10. Kriteriji testa udaračem u obliku noge [20]

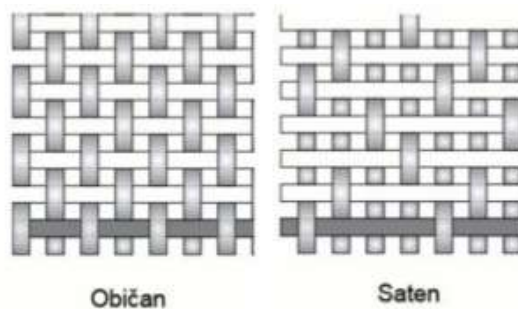
5. POLIMERNI KOMPOZITNI MATERIJALI ZA IZRADU PREDNJEG BRANIKA AUTOMOBILA

U ovom radu izrađivat će se tri ispitne kompozitne ploče od različitih vrsta vlakana, pletiva i smola. Cilj izrade je ispitivanje količine apsorbirane energije u ispitnoj ploči s obzirom na vrstu kompozitnog materijala. U ispitivanju će se koristiti i pjena od poliuretana (PUR) različitih debljina i gustoća, također s ciljem promatranja mogućnosti apsorpcije udarne energije.

Zbog toga što pojedinačna vlakna imaju svoje prednosti i nedostatke uobičajeno je primijeniti hibridne kompozite, odnosno slagati kompozit od različitih vrsta vlakana. Da bi se uopće vidjelo koji hibridni kompozit je najbolji za prednji branik automobila, ispitivanje se prvotno provodi na ravnim pločama.

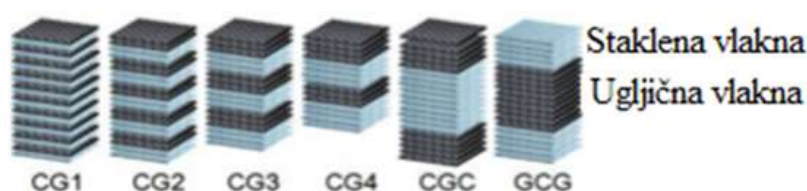
Prva ispitna ploča izradit će se od staklenih vlakana i poliesterske smole. Staklena vlakna tkana su u triaksijalnu tkaninu 0/45/45, što znači da su niti u tkanju orijentirane u tri smjera. Ova kombinacija odabrana je s razlogom što su staklena vlakna najjeftinija, a poliesterska smola najčešće upotrebljavana komercijalna smola.

Druga ispitna ploča izradit će se od ugljičnih i aramidnih vlakana, te epoksidne smole prema diplomskom radu Marka Špoljara: *Ispitivanje kompozitnih tvorevina za primjenu u automobilskoj industriji*, 2016. [1] Budući da kompoziti pokazuju najbolja svojstva kada sile i naprezanja djeluju u smjeru vlakana, odabrana su ugljična vlakna tkana u obliku običnog tkanja, te aramidna vlakna tkana u obliku saten veza (slika 5.1). Odabrano je da se s vanjske strane nalaze tkanja od ugljičnih vlakana koja se rotiraju za 0° i 45° , a u unutrašnjosti tkanja od aramidnih vlakna pod 0° . Aramidna vlakna stavljaju se u unutrašnjost zbog povećanja žilavosti, a zakretanjem ugljičnih vlakana izvana postiže se viša čvrstoća kompozitne tvorevine.



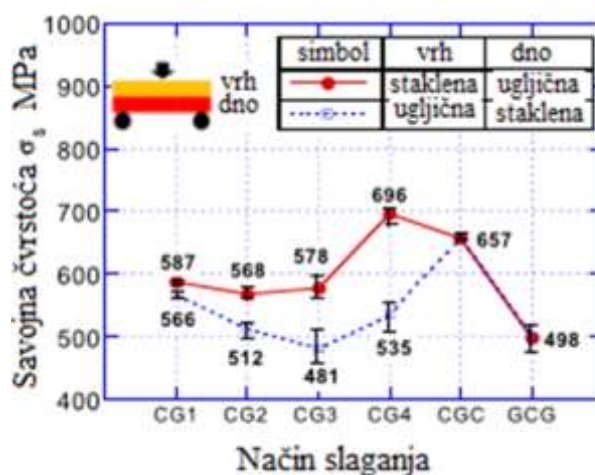
Slika 5.1. Vrste tkanja ojačavala [1]

Treća ispitna ploča izradit će se od ugljičnih i staklenih vlakana, te epoksidne smole prema istraživanju i rezultatima u članku autora Jun Hee Song-a: *Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers*, 2015. [26] Upotrebljena su ugljična vlakna u obliku običnog tkanja i staklena vlakna u obliku triaksijalne tkanine, vlakna će u kompozitu biti poslagana tako da se staklena vlakna nalaze s vanjske strane branika, potom ugljična, staklena i završetak ugljična vlakna (slika 5.2 – CG4).



Slika 5.2. Različiti način slaganja staklenih i ugljičnih vlakana u kompozitu [26]

Odabran je taj raspored zbog toga što su ispitivanja gore prikazanih kompozita pokazala najbolje rezultate za rasteznu i savojnu čvrstoću te modul elastičnosti (slika 5.3).



Slika 5.3. Vrijednosti savojne čvrstoće za različita slaganja vlakana [26]

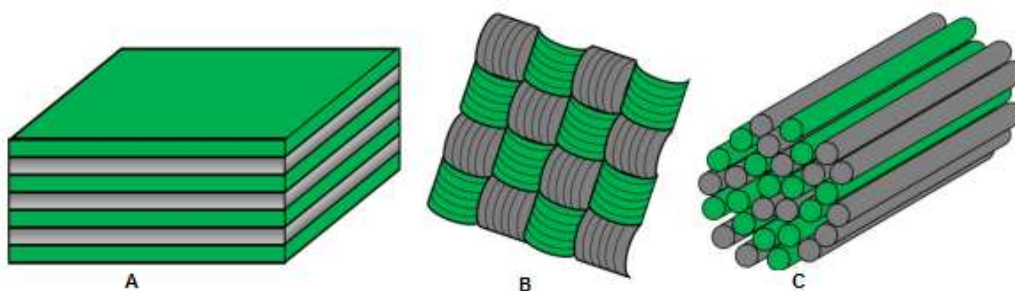
U ovom poglavlju opisani su materijali vlakana i smola, te postupci izrade ispitnih ploča koji će se primijeniti u ovom ispitivanju, odnosno koji bi se mogli primijeniti za izradu prednjeg branika automobila. Također, opisana je pjena od poliuretana, koja se može potencijalno upotrijebiti kao apsorber udarne energije u sustavu automobilskih branika.

5.1. Hibridni kompoziti

Hibridni kompoziti su kompoziti koji sadrže najmanje dvije različite vrste ojačavala u zajedničkoj jedinstvenoj matrici. [27] Ovi kompoziti nastali su zbog toga što se na taj način mogu poboljšati željena mehanička svojstva, te tako zadovoljiti postavljeni kriteriji određene primjene. Općenito, svrha dovođenja dvije vrste vlakana u jednu kompozitnu matricu je održavanje prednosti oba vlakna i ublažavanje nekih njihovih nedostataka. [28]

Najčešće se upotrebljavaju tri vrste hibridnih kompozita koja se razlikuju po načinu slaganja vlakana (5.4): [28]

- sloj po sloj različitih vrsta tkanja,
- tkanje sastavljeno od različitih vlakana,
- međusobno pomiješana različita vlakna.



Slika 5.4. Različiti hibridni kompoziti: a) sloj po sloj različitih vrsta tkanja, b) tkanje sastavljeno od različitih vlakana, c) međusobno pomiješana različita vlakna [28]

Hibridni kompozit koji se sastoji od slojeva različitih vrsta tkanja (slika 5.4.a) predstavlja najjednostavniji i najjeftiniji postupak za proizvodnju. Tkanja su položena jedna na druga, različitim redoslijedom. Najčešće se upotrebljava naizmjenični redoslijed - sloj jedne vrste tkanja, pa sloj druge vrste tkanja, i tako dok se ne postigne željena debljina. Također, moguće je polagati nekoliko slojeva iste vrste tkanja, pa tek onda druge vrste.

Kod ove vrste hibridnog kompozita moguće je rotirati svaki sloj tkanja čime se postižu jednaka svojstva u svim smjerovima. To je iznimno bitno kod izradaka koji će u primjeni biti opterećeni u različitim smjerovima. [28]

Tkanja koja su sastavljena od različitih vrsta vlakana (slika 5.4.b) najčešće nastaju tkanjem dvije vrste vlakana u jedno jedinstveno tkanje. Velika prednost ovog postupka je mogućnost nastanka tkanja željenih svojstava. Danas se najčešće upotrebljavaju kombinacije ugljičnih i aramidnih vlakana, aramidnih i staklenih vlakana, te ugljičnih i staklenih vlakana. Ugljik/aramid tkanje (slika 5.5.a) ima visoku žilavost i rasteznu čvrstoću od aramidnih vlakana, visoku tlačnu i rasteznu čvrstoću od ugljičnih vlakana. Na taj se način dobiva kompozit više čvrstoće i žilavosti, a niske gustoće. Glavni nedostatak ovakvog hibridnog kompozita je njegova visoka cijena. Aramid/staklo tkanje (slika 5.5.b) ima malu gustoću, visoku žilavost i rasteznu čvrstoću od aramidnih vlakana, te visoku tlačnu čvrstoću i nisku cijenu od staklenih vlakana. Ugljik/staklo tkanje (slika 5.5.c) ima visoku krutost, rasteznu i tlačnu čvrstoću od ugljičnih vlakana. Staklena vlakna u ovom tkanju najviše doprinose nižoj cijeni kompozita. [28, 29]



Slika 5.5. Različita hibridna tkanja: a) ugljik/aramid, b) aramid/staklo, c) ugljik/staklo [5,29]

Hibridni kompozit koji se sastoji od međusobno pomiješanih različitih vlakana (slika 5.4.c) nastaje slaganjem pojedinih različitih vlakana. Na taj se način dobivaju unidirekcijske (jednosmjerne) tkanine koje se upotrebljavaju za izratke koji će u eksploataciji biti opterećeni u jednom smjeru. [29]

Hibridni kompoziti omogućuju postizanje različitih mehaničkih svojstava. Upravo zbog toga postoje njihove različite vrste, ovisne o primjeni. U ovom radu upotrijebit će se dvije vrste hibridnih kompozita (prema slici 5.4.a) kako bi se mogla pokazati njihova potencijalna iskoristivost u proizvodnji automobilskih branika.

5.2. Materijali komponenata polimernih kompozita za izradu ispitnih ploča

5.2.1. Materijali matrice

Za proizvodnju prednjeg branika automobila najviše se primjenjuju duromerne poliesterske i epoksidne smole. [6]

Poliesterske smole imaju najširu primjenu od svih ostalih smola za materijal matrice. One su mješavina poliestera i monomera, najčešće stirena. Dodatak stirena (do 50 %) smanjuje viskoznost smole i olakšava primjenu. Stiren prvenstveno služi za povezivanje molekula poliestera i samim time očvršćuje materijal, bez nastajanja nusprodukata. [30] Poliesterske smole povišuju rasteznu i savojnu čvrstoću kompozitnih tvorevina, te osiguravaju dobru kemijsku postojanost i postojanost na koroziju. Velika prednost poliesterskih smola je njihova niska cijena koja im omogućuje široku primjenu u komercijalne i industrijske svrhe. Najčešća ojačavala za ove smole su staklena vlakna, što omogućuje odlična mehanička svojstva i prihvatljiv utjecaj na okoliš. [5] Slika 5.6 prikazuje umreženu poliestersku smolu karakteristične smeđo-žute boje.



Slika 5.6. Umrežena poliesterska smola [5]

Epoksidne smole imaju izvrsnu rasteznu čvrstoću i rastezni modul elastičnosti, kao i ostala mehanička svojstva. Postojane su na atmosferilije, agresivne medije i vodu. Dobro prijanjaju uz ojačavalo, što je važno za prijenos naprezanja u kompozitnim materijalima. Epoksidne smole se pri očvršćivanju malo stežu, čime se smanjuju zaostala naprezanja u materijalu. [30] Također, one povišuju otpornost na umor materijala i imaju dobra električna svojstva. Time postaju najvažnije smole za ojačavanje vlaknastih kompozita koji se primjenjuju ne samo u automobilskoj industriji, već i u brodogradnji i zrakoplovnoj industriji.

Epoksidne smole se najčešće ojačavaju ugljičnim i aramidnim vlaknima te tako pružaju širok spektar mogućih mehaničkih svojstava. [5] Slika 5.7 prikazuje umreženu epoksidnu smolu karakteristične blago prozirne boje.



Slika 5.7. Umrežena epoksidna smola [5]

Smolama se prilikom izrade kompozita mora dodati umreživalo i ubrzavalo. Umreživalo se dodaje kako bi došlo do procesa umreživanja makromolekula, a ubrzavalo kako bi se taj proces ubrzao.

5.2.2. Materijali vlakana

Prilikom proizvodnje prednjeg branika automobila najviše se upotrebljavaju staklena, ugljična i aramidna ojačavala koja zadovoljavaju visoke postavljene zahtjeve.

Staklenim vlaknima ojačan polimerni kompozit sastoji se od staklenih vlakana, kontinuiranih ili diskontinuiranih, koja se nalaze u polimernoj matrici. [1] Staklo je najpopularniji materijal koji se upotrebljava kao ojačavalo u proizvodnji suvremenih kompozita. Tome pridonosi njegova jednostavna i ekonomična proizvodnja. Najprije se sirovina stakla zagrijava pri temperaturi od 1600 °C te se u rastaljenom stanju dovodi u peć za izvlačenje vlakana. Rastaljeno staklo prolazi kroz nekoliko otvora kako bi se formirala pojedinačna vlakna koja se potom režu na određenu dužinu ovisno o potrebi za kontinuiranim ili kraćim diskontinuiranim vlaknima. Tako proizvedena vlakna prije uporabe se apretiraju radi boljeg prijanjanja o polimernu matricu. Apretiranje je postupak kojim se poboljšavaju svojstva (npr. prionjivost) ili poljepšava izgled (npr. tkanini). [31]

Osnovne vrste staklenih vlakana koje se najviše upotrebljavaju su E-staklo, S-staklo i C-staklo. E-staklo ima dobra izolacijska svojstva, dobar odnos cijene i mehaničkih svojstava, te se primjenjuje u elektronici. S-staklo se primjenjuje pri višim temperaturama, dok se C-staklo primjenjuje uz veće zahtjeve kemijske postojanosti. Ostale vrste stakla su A, D, R i M-stakla. [5]

Prednosti kompozita sa staklenim vlaknima su niska cijena, visoka specifična čvrstoća, postojanost pri višim temperaturama i korozijskim opterećenjima, postojanost na starenje, dimenzijska stabilnost, te dobra električna svojstva. [5] Na slici 5.8 prikazana su staklena vlakna.

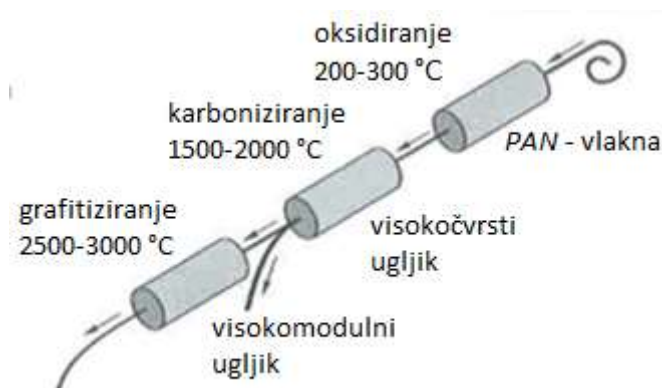


Slika 5.8. Staklena vlakna [32]

Ugljik je visokoučinkovit vlaknasti materijal koji se najčešće primjenjuje za ojačavanje suvremenih kompozita s polimernom matricom. [2] Ugljična vlakna dobivaju se kontroliranom oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom ugljikom bogatih organskih prethodnika koji su u vlaknastom obliku. Najčešći takav prethodnik je poliakrilonitril (PAN) koji daje najbolja svojstva vlaknima. [30] Karbonizacijom se stabilizirani PAN pirolizira u ugljična vlakna pri inertnoj atmosferi, a grafitizacijom se postižu veći sadržaji ugljika i izrazitija grafitna mikrostruktura. [5]

Podušavanjem parametara tijekom procesa grafitizacije dobivaju se ili vlakna visoke rastezne čvrstoće ili vlakna visokog modula elastičnosti. Nakon oblikovanja, vlakna se podvrgavaju površinskoj obradi kako bi se poboljšalo njihovo prijanjanje uz matricu. Ugljična vlakna se još mogu proizvoditi od katrana i celuloze. [5]

Slika 5.9 prikazuje proizvodnju ugljičnih vlakana od poliakrilonitrila.



Slika 5.9. Proizvodnja ugljičnih vlakana [2]

Prema čvrstoći i krutosti, ugljična vlakna se klasificiraju u sljedeće skupine: visokočvrsta vlakna, vlakna standardnog modula elastičnosti, vlakna srednjeg i prijelaznog modula elastičnosti, vlakna visokog modula elastičnosti i vlakna ultravisokog modula elastičnosti. [5]

Ugljična vlakna imaju najvišu specifičnu čvrstoću i najvišu specifičnu krutost od svih vlaknastih materijala za ojačavanje. Također imaju visoki rastezni modul i visoku čvrstoću koju zadržavaju pri povišenim temperaturama. Ugljična vlakna postojana su na vlagu i niz otapala, kiselina i lužina te imaju malu toplinsku rastezljivost. [5] Slika 5.10 prikazuje ugljična vlakna.



Slika 5.10. Ugljična vlakna [33]

Na temelju mnogobrojnih dobrih svojstava ugljična vlakna su najčešće primjenjivana ojačavala za automobilsku industriju. Relativno jeftina proizvodnja ugljičnih vlakna i kompozitnih tvorevina odgovara na zahtjeve tržišta. Kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima imaju odličnu postojanost na koroziju, puzanje i umor materijala. [5]

Aramidna vlakna su sintetski organski polimeri (aromatski poliamidi) proizvedeni predenjem kontinuiranog vlakna iz kapljevite smjese. [30] Najvažnija svojstva aramidnih vlakana su visoka rastezna čvrstoća, niska gustoća te karakteristična zlatno-žuta boja. Valja napomenuti da aramidna vlakna imaju najvišu uzdužnu rasteznu čvrstoću i najviši rastezni modul elastičnosti od svih ostalih polimernih vlaknastih materijala. [5]

Proizvodnja aramidnih vlakana započinje ekstrudiranjem i predenjem kontinuiranih vlakana. Kako se u proizvodnom postupku za otapanje aramida upotrebljava gotovo 100 % sulfatna kiselina, nakon ekstrudiranja nastavljaju se operacije pranja i neutralizacije vlakana te, ako je potrebno, dodatne obrade kojima se modificiraju određena svojstva vlakana. [34]

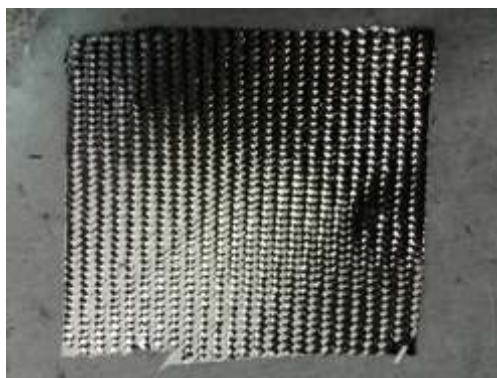
Prva aramidna vlakna proizvedena su u američkoj kompaniji *DuPont* pod komercijalnim nazivom Kevlar. Na temelju vrijednosti rasteznog modula elastičnosti razlikujemo: Kevlar 29 – visoka žilavost, Kevlar 49 – visoki rastezni modul elastičnosti i Kevlar 149 – vrlo visoki rastezni modul elastičnosti. Aramidna vlakna poznata su po svojoj krutosti i žilavosti, niskoj abrazijskoj trošivosti, otpornosti na udar i umor materijala. Zbog visokog udjela kristalaste strukture i anizotropnih svojstava aramidna vlakna pokazuju visoku otpornost puzanju. [34] Također, otporna su na zapaljenje te toplinski stabilna pri relativno visokim temperaturama. Glavni nedostatak aramidnih vlakana je osjetljivost na UV zrake. Nedostatak aramidnih vlakana je i relativno slaba adhezijska veza s matricom te je zbog toga njihova primjena u postupku ručnog laminiranja ograničena. Aramidna vlakna jeftinija su od ugljičnih vlakana, ali nisu zadovoljavajuća zamjena u zahtjevnim primjenama zbog svoje niske tlačne čvrstoće. [5] Na slici 5.11 prikazana su aramidna vlakna.



Slika 5.11. Aramidna vlakna [35]

Vlakna za izradu kompozitnih branika automobila najčešće se upotrebljavaju u obliku različitih tkanina. Tkanine se dobivaju tkanjem kontinuiranih staklenih, ugljičnih, aramidnih vlakana ili njihovom kombinacijom u svrhu dobivanja jednoslojnih ili višeslojnih tkanina. Pod tkanjem se podrazumijeva način prepletanja vlakana. Mehanička svojstva kompozitnih dijelova mogu se znatno poboljšati različitim načinima polaganja tkanina i vrstom tkanja.

Obično tkanje je jednostavna ukrižena tkanina koja se sastoji od isprepletenih kontinuiranih vlakana. Ako su vlakna mrežasto postavljena u dva međusobno okomita smjera, tada ojačavaju konstrukciju u oba smjera, a novostvoreni kompozit ima ortotropna mehanička svojstva i zato su takva ojačanja osobito korisna ako se ne zna točan smjer djelovanja najvišeg opterećenja. Takav oblik tkanine olakšava i rukovanje jer se prilikom izrade vlakna drže zajedno i lako se mogu prilagoditi obliku kalupa. U obliku običnog tkanja najviše se upotrebljavaju ugljična i aramidna vlakna. [5] Slika 5.12 prikazuje ugljična vlakna u obliku običnog tkanja.



Slika 5.12. Ugljična vlakna u obliku običnog tkanja [5]

5.3. Postupci izrade polimernih kompozita za izradu ispitnih ploča

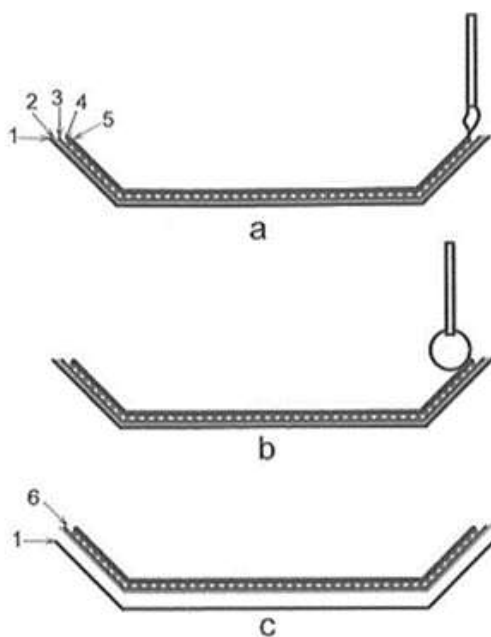
U ovom poglavlju bit će detaljno opisana samo dva postupka proizvodnje kompozita jer će se samo oni upotrebljavati za izradu kompozitnih ploča u ovom radu.

5.3.1. Ručni dodirni postupak laminiranja

Ručni dodirni postupak laminiranja (e. *Lay-up Moulding*) pripada postupcima proizvodnje polimernih kompozita u otvorenim kalupima. Kod ovih postupaka slojevi smole i ojačavala nanose se u slojevima sve dok se ne dosegne željena debljina, a nakon toga slijedi umreživanje. Prednosti postupaka pred onima sa zatvorenim kalupom su niža cijena zbog

primjene samo jedne strane kalupa, mogućnost dobivanja vrlo velikih i složenih oblika, veći broj različitih kombinacija materijala matrice i ojačala. Veliki nedostatak ovih postupaka je činjenica da je glatka samo jedna površina izratka, a upravo je to jedna od prednosti proizvodnje u zatvorenim kalupima. Također, kod ovih je postupaka potrebno uložiti dosta rada i truda kod polaganja slojeva smole i ojačavala, odnosno zahtijevaju se kvalificirani radnici s puno iskustva. [36]

Ručni dodirni postupak laminiranja (slika 5.13) je najstariji postupak proizvodnje polimernih kompozita, posebno prikladan za male proizvodne serije srednjih do vrlo velikih izradaka. Kalupi za ručno laminiranje otvoreni su i nastoje se graditi jednostavno i od jeftinog materijala, od drva ili nekoga polimernog materijala, rjeđe od metala. Ako se izrađuju od polimernog materijala upotrebljavaju se plastomerni kompoziti ojačanim staklenim vlaknima. Njihova proizvodnja je jeftina te su pogodni za manje serije, ali se brzo troše. [5, 36]



Slika 5.13. Dodirni postupak laminiranja: 1 – otvoreni kalup, 2 – odvajalo, 3 – gelna prevlaka, 4 – ojačavalo, 5 – hladno očvršćujuća smola, 6 – gotov proizvod; a – nanošenje odvajala, gelne prevlake, ojačavala i smole, b – istiskivanje zraka između slojeva, c – odvajanje proizvoda od kalupa [5]

Postupak se može raščlaniti u pet faza: priprema kalupa i čišćenje, nanošenje gelne prevlake, nanošenje slojeva smole i vlakana, umreživanje i skidanje gotovog proizvoda s

kalupa. Priprema kalupa za proizvodnju započinje čišćenjem kalupne šupljine. Najprije se uklone ostaci smole i vlakana koji su ostali od prethodne izrade, a potom se nanosi odvajalo (najčešće vosak). Vosak štiti kalup od smole te služi za lakše odvajanje proizvoda od kalupa. Vrlo je bitno da se vosak nanese u što tanjem sloju i dobro ispolira. [5]

Nakon toga se na kalup kistom nanosi gelna prevlaka. Ona je vanjski sloj proizvoda koji sadržava sve potrebne dodatke poput pigmenta, UV-stabilizatora i drugih, koji tvore željena svojstva površine proizvoda. Nanošenje prevlake vrlo je zahtjevan posao, koji traži iskustvo, znanje i koncentraciju izvođača. Prevlaka se mora u što kraćem roku nanijeti na kalup, ali pritom treba paziti da se nanosi u dovoljno debelom i ujednačenom sloju. [5]

Nakon gelne prevlake slijedi priprema ojačavala i smole. Prije polaganja ojačavala se moraju skrojiti prema obliku kalupa. Time se postiže njihovo lakše polaganje, brži ciklus proizvodnje, te se štedi na materijalu (kroji se po mjeri, pa se ništa ne baca). Pri ovom postupku mogu se primijeniti sve vrste duromernih smola, te sve vrste vlakana u različitim oblicima tkanja. Problem se jedino može javiti u slučaju aramidnih vlakana koje je teže natopiti ručno. Nakon što se iskroje ojačavala i smoli doda umreživalo i ubrzavalo postupak ručnog laminiranja može započeti. U kalup se polažu slojevi ojačavala i dobro se natapaju smolom. Smola se nanosi kistom, a svaki se sloj smole mora ručno razvaljati valjkom kako bi se smola što bolje impregnirala s vlaknima i kako bi se uklonio zrak zadržan između slojeva. [5]

Kalup se zatim odnosi u peć ili se ostavlja na sobnoj temperaturi kako bi moglo doći do umreživanja. Vrijeme umreživanja ovisi o veličini izratka, te količini umreživala i ubrzavala u smoli. Nakon vađenja gotovog izratka potrebno je napraviti završnu obradu. Rezanjem se odstranjuje srh, a brušenjem se postiže fini glatki rub izratka. [5]

Ručni dodirni postupak laminiranja je vrlo jednostavan postupak proizvodnje kompozitnih materijala. Njime možemo proizvoditi komplicirane oblike velikih dimenzija pomoću različitih materijala matrice i ojačavala, te tako postići izvrsna mehanička svojstva. Trošak izrade alata je vrlo malen, a udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrecavanjem. Nedostatak postupka je dugotrajnost, male serije, gruba površina te veliki utjecaj vještine radnika na kvalitetu proizvoda. [36]

Ručni dodirni postupak laminiranja može se upotrebljavati samostalno ili može predstavljati osnovu za polaganje ojačavala i smole, kao kod postupka izravnog prešanja.

5.3.2. Postupak izravnog prešanja

Izravno prešanje (e. *Compression Moulding*) pripada postupcima izrade polimernih kompozita u zatvorenim kalupima. Zatvoreni kalup smatra se kalupom koji ima donju i gornju polovicu kalupa izrađenu od istog materijala, ili ima gornju polovicu izrađenu od nekog drugog materijala (lakšeg ili jeftinijeg). Velika prednost zatvorenih kalupa je mogućnost izrade proizvoda koji imaju glatku i donju i gornju površinu, koji imaju veći udio ojačala, a manji udio smole. Također, ovim se postupcima onemogućuje nastajanje mjesta u izratku koja nisu natopljena smolom, ako se radi o manje složenijim proizvodima. Glavni nedostatak ovih postupaka je visoka cijena kalupa i ostale opreme (potrebni su tlakovi za prešanje i ubrizgavanje), te potreba za stalnom edukacijom i razvojem tehnologije. [36]

Postupak izravnog prešanja uključuje polaganje ojačavala u donju polovicu kalupa i upotrebu gornje polovice kalupa kako bi se oblikovao potrebn oblik proizvoda. Zatvoreni kalupi ili tzv. muško-ženski kalupi izrađuju se od istog materijala, te mogu poprimiti složene oblike, ali i ravne (izrada kompozitnih ploča). Ovaj postupak prikladan je za srednju proizvodnju između 1 000 i 10 000 dijelova godišnje. [37]

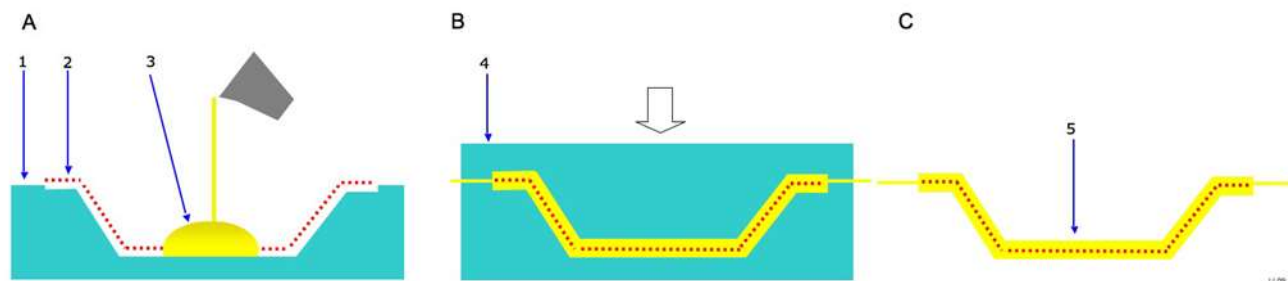
S obzirom na to da li se kalup grije ili ne razlikujemo: [37]

- Hladno izravno prešanje (e. *Cold Press Moulding*),
- Toplo izravno prešanje (e. *Hot Press Moulding*).

5.3.2.1. Hladno izravno prešanje

Kod hladnog izravnog prešanja kalupi se upotrebljavaju pri sobnoj temperaturi, te se u postupku primjenjuju niski tlakovi 1-5 bara. [37] Zbog toga se kalupi mogu izraditi od kompozitnih materijala čija je proizvodnja jeftinija. Postupak započinje pripremom kalupne šupljine, što uključuje uklanjanje ostataka smole u kalupu, nanošenje odvajala, najčešće vosak, te njegovo poliranje. Na kalup se po potrebi i zahtjevima može nanijeti i gelna prevlaka. Nakon toga slijedi polaganje smole i ojačala identičnim načinom kako se to čini kod ručnog dodirnog postupka laminiranja. Potom se pomoću pritiska zatvara kalup i slijedi umreživanje pri sobnoj temperaturi. Na izratku su mogući postupci završne obrade, poput rezanja i brušenja rubova. [5, 37]

Slika 5.14 prikazuje postupak hladnog izravnog prešanja.



Slika 5.14. Hladno izravno prešanje: a - nanošenje smole i ojačala, b - zatvaranje kalupa, c - konačni izradak; 1 - donja polovica kalupa, 2 - ojačalo, 3 - smola, 4 - gornja polovica kalupa, 5 - izradak [38]

U ovom postupku izravnog prešanja mogu se upotrijebiti ojačala u obliku različitih tkanja, te najčešće duromerne smole. Prednost ovog postupka u odnosu na ručno laminiranje je kvalitetna i donja i gornja površina izratka. Također, ostale prednosti ovog jednostavnog i učinkovitog postupka su nepotreba za grijanjem kalupa, niske sile držanja kalupa, te jeftinija proizvodnja. Nedostatak je visoka cijena kalupa, te dugotrajnost ciklusa oblikovanja, a samim time i niža proizvodnost. [39]

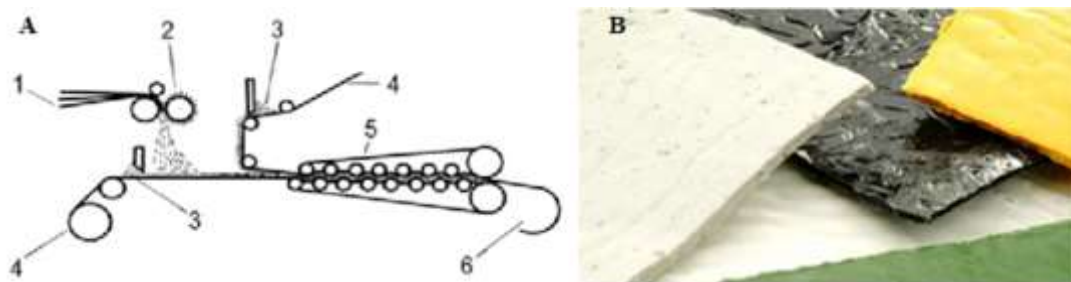
5.3.2.2. Toplo izravno prešanje

Kod toplog izravnog prešanja kalupi se griju pri temperaturi 100-160 °C, te se upotrebljavaju visoki tlakovi 15-50 bara. [37] Zbog toga kalupi moraju biti izrađeni od metala, što znatno poskupljuje postupak. U odnosu na hladno izravno prešanje proizvodnja se ubrzava zbog bržeg umreživanja pri višoj temperaturi i višim tlakovima.

Za ovaj postupak mogu se upotrijebiti duromerne smole, te različiti predoblici ojačavala što dodatno ubrzava postupak izrade (nema dugotrajnog ručnog laminiranja vlakana). Razlikujemo nekoliko predoblika: pločasti osmoljeni listovi, plastomer ojačan staklenim matom, te vlaknasti preprezi. [36]

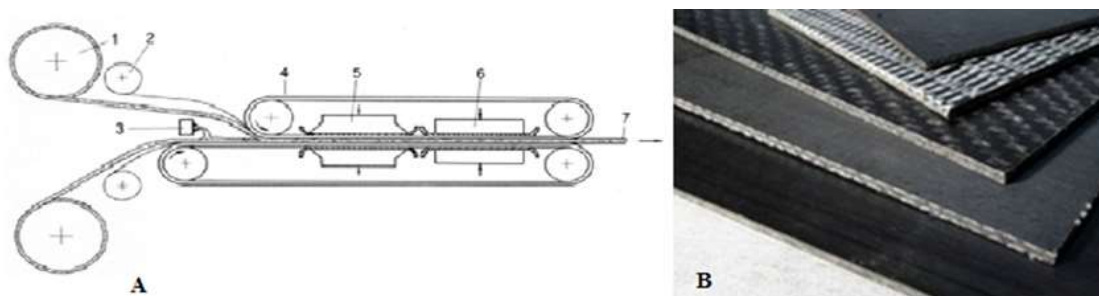
Pločasti osmoljeni listovi SMC (e. *Sheet Moulding Compound*) predstavljaju ojačane pripreme za izravno prešanje koji se pretežno sastoje od nezasićene poliesterske smole, očvršćivala, mineralnih punila, vlaknastih ojačavala i ostalih dodataka. Njihova debljina iznosi od 2 do 3 mm, a duljina vlakana 12 do 50 mm koja mogu biti slučajno ili usmjereno

raspoređena. Proizvodnja osmoljenih matova (slika 5.15.a) izgleda tako da se između dvije noseće folije (4) nanosi smola s punilom (3) te nasjeckana vlakna (1-2), a potom se kroz elemente za slatičvanje (5) spajaju dvije folije u konačni proizvod (slika 5.15.b). [36]



Slika 5.15. a) Proizvodnja pločastih osmoljenih matova, b) pločasti osmoljeni matovi [36, 40]

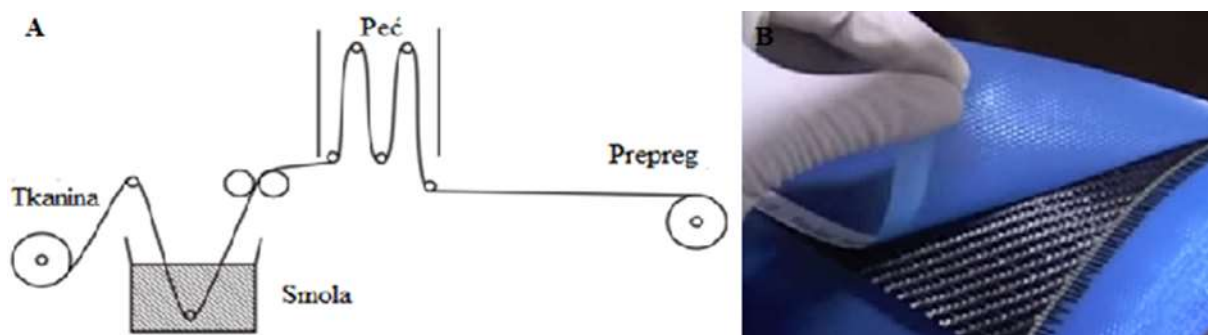
Plastomer ojačan staklenim matom GMT (e. *Glass Mat-reinforced Thermoplastic*) sastoji se od staklenog mata najčešće natopljenog polipropilenom, ali moguće je i poliamidom. Njegova proizvodnja (slika 5.16.a) sastoji se od toga da se rastaljeni plastomer ekstrudira (3) između dva sloja staklenog mata (1) i folije (2), te da se uz pomoć dvovrpčane preše (4), područja vrućeg kaširanja (5) i rashladne zone (6) pretvara u gotovi plastomerni pripremak (7) (slika 5.16.b). [36]



Slika 5.16. a) Proizvodnja plastomera ojačanog staklenim matom, b) plastomer ojačan staklenim matom [36, 41]

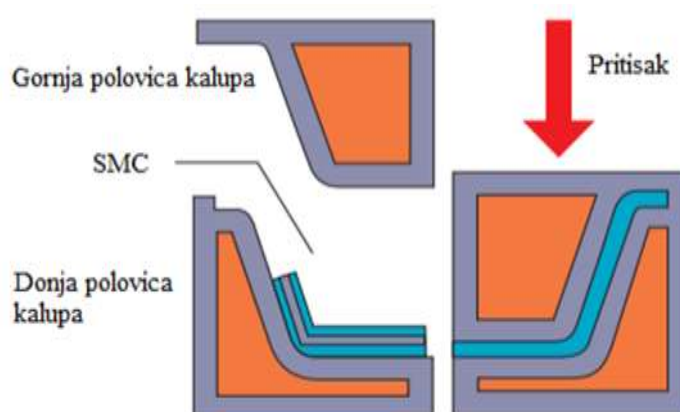
Prepreg (e. *Pre-preg*) je tkanina impregnirana s djelomično umreženom polimernom smolom. Izrađuju se najčešće od epoksidnih i fenolnih smola i ojačavala, ali im se za razliku od osmoljenih listova ne dodaju punila i ostali dodaci. Pri proizvodnji (slika 5.17.a) tkanina se natapa sa smolom, te prolazi kroz valjke gdje se odvaja višak smole i prolazi kroz peć gdje

se isparavaju otapala i dolazi do prve faze umreživanja. Zatim se hladi da se spriječi daljnje umreživanje koje će se postići prilikom izrada proizvoda u kalupu. [36] Slika 5.17.b prikazuje prepreg od ugljičnih vlakana.



Slika 5.17. a) Proizvodnja preprega, b) prepreg od ugljičnih vlakana [5, 36]

Postupak toplog izravnog prešanja započinje identičnom pripremom kalupne šupljine kao i kod hladnog izravnog prešanja. Nakon toga u zagrijani kalup stavlja se jedan od različitih predoblika ojačala, te se zatvara kalup. Grijanje kalupa ostvareno je uz pomoću pare, elektriciteta ili vrućeg ulja do temperature od 160 °C. Nakon dovoljnog stupnja umreživanja tvorevina se vadi iz kalupa i umreživanje se može nastaviti u peći. [37] Proizvodnja s pločastim osmoljenim listom prikazana je na slici 5.18.

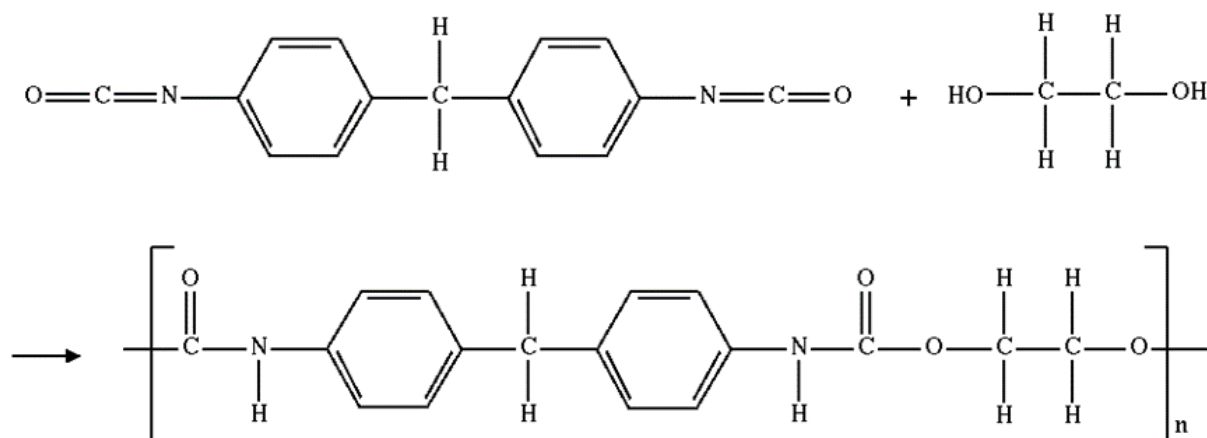


Slika 5.18. Proizvodnja s pločastim osmoljenim listom [37]

Postupkom toplog izravnog prešanja dobivaju se tvorevine visoke krutosti i čvrstoće, s visokom kvalitetom površine. Postupak je pogodan za masovnu proizvodnju zbog ubrzane proizvodnje koja je uvjetovana grijanjem kalupa i višim tlakovima. Nedostatak postupka su visoki troškovi za kalup i strojeve, te je potrebna priprema i pravilno umetanje predoblika za ojačavanje kompozita. [39]

5.4. Pjena od poliuretana (PUR)

Poliuretani su linearni polimeri koji imaju molekularnu okosnicu koja sadrži karbamatne skupine ($-\text{NHCO}_2$). Te skupine, nazvane uretan, proizvode se putem kemijske reakcije između diizocijanata i poliola. Poliuretani, također poznati kao polikarbamati su polimerni materijali čije se makromolekule sastoje od manjih, ponavljajućih jedinica poznatih kao monomeri. Općenito, sastoje se od primarne dugolančane osnovne molekule s priloženim bočnim skupinama (slika 5.19). [42]



Slika 5.19. Sinteza poliuretana, pri čemu uretanske grupe $-\text{NH}-(\text{C}=\text{O})-\text{O}-$ povezuju molekularne jedinice [42]

Poliuretani se proizvode reakcijom monomera u reakcijskoj posudi. Kako bi se proizveo poliuretan, obavlja se stupnjevita reakcija također poznata kao kondenzacija. U ovom tipu kemijske reakcije, prisutni monomeri sadrže reakcijske krajnje skupine. Specifično, diizocijanat (OCN-R-NCO) reagira s diolom (HO-R-OH). Prvi stupanj ove reakcije rezultira kemijskim povezivanjem dviju molekula što ostavlja reaktivni alkohol (OH) na jednoj strani i reaktivni izocijanat (NCO) na drugoj. Ove skupine reagiraju s drugim monomerima kako bi

oblikovale veće i dulje molekule. Ovo je brz postupak koji daje visoke molekularne mase materijala pri sobnoj temperaturi. [42]

Pri proizvodnji poliuretana upotrebljavaju se različiti dodaci koji štite polimer od okolnih utjecaja kao što su to toplina, svjetlo, atmosferski zagađivači i klor. Upotrebljavaju se stabilizatori koji štite od degradacije uzrokovane svjetlom, tzv. hidroksibenzotriazoli. Kao zaštita od reakcije oksidacije upotrebljavaju se antioksidansi. Također, se mogu upotrijebiti spojevi koji inhibiraju diskoloraciju izazvanu atmosferskim onečišćenjem. Ovisno o željenim svojstvima krajnjeg proizvoda, polimeru se mogu dodati i drugi dodaci kao što su to katalizatori, sredstvo za ekspaniranje, inhibitori plamena, dodaci za dobivanje određene gustoće poliuretana. Zbog brojnih dodataka moguće je proizvesti različite vrste proizvoda: krute i savitljive poliuretanske pjene, ljepila, premaze, brtvila, itd. [42]

Savitljiva poliuretanska pjena predstavlja jednostavan proizvod, koji se može lako oblikovati u gotovo bilo koji oblik. Upotrebljava se u neograničenom broju upotreba: izrada namještaja i posteljine, ambalaže, podloga za tepihe, tekstila i vlakana, te u automobilskoj industriji. Dobro funkcionira u kombinaciji s drugim materijalima, kao što su to vlakna i opruge. Prednost ovih pjena je mogućnost postizanja različitih svojstava iako pjene ostaju vizualno iste. Tako se mogu proizvesti pjene različite gustoće koje su na prvi pogled iste, a zapravo imaju različita svojstva. [42] Važno svojstvo ovih pjena je mogućnost apsorpcije energije, stoga se one mogu potencijalno primjenjivati kao apsorberi udarne energije u sustavu automobilske branike. Na slici 5.20 prikazana je pjena od poliuretana.



Slika 5.20. Pjena od poliuretana

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Uvod

Eksperimentalni dio ovog rada sastoji se od izrade tri vrste različitih ispitnih kompozitnih ploča, te ispitivanja njihove apsorpcije udarne energije u kombinaciji s poliuretanskom pjenom (PUR). Cilj ispitivanja je odrediti količinu apsorbirane energije s obzirom na vrstu kompozitnog materijala i poliuretanske pjene, te na temelju dobivenih rezultata zaključiti koja vrsta kompozitne tvorevine i pjene ima potencijala za izradu sustava branika u automobilima.

6.2. Izrada ispitnih kompozitnih ploča

Sve tri vrste ispitnih kompozitnih ploča izrađene su postupkom izravnog prešanja čiji se način polaganja ojačavala i smole temelji na postupku ručnog laminiranja. Za svaku vrstu kompozitne ploče izrađene su po tri ispitne ploče, odnosno ukupno je izrađeno devet ploča. Razlog tome je određeni broj ponavljanja ispitivanja kako bi se mogla dobiti srednja vrijednost rezultata.

Debljina ispitnih ploča određena je uz pomoću članka autora Prabhakaran, S., Chinnarasu, K., Senthil Kumar, M.: *Design and Fabrication of Composite Bumper for Light Passenger Vehicles*, 2012. [6] Debljina je određena prema izrazu:

$$\frac{M}{I} = \frac{R_m}{y}, \quad (6.1)$$

gdje je: M - moment savijanja (Nm),
 I - moment inercije (m^4),
 R_m - rastezna čvrstoća (N/m^2),
 $y = d/2$, d - debljina branika (m).

Moment inercije računa se prema izrazu:

$$I = \frac{b \cdot d^3}{12}, \quad (6.2)$$

gdje je b - širina branika (m).

Dimenzije debljine i širine branika izmjerene su na čeličnom braniku automobila (slika 6.1): $d = 0,002$ m, $b_1 = 0,025$ m, $b_2 = 0,091$ m, $b_3 = 0,025$ m.



Slika 6.1. Čelični branik automobila

Branik je podijeljen na tri područja, pa sukladno tome postoje tri momenta inercije:

$$I_1 = \frac{0,025 \cdot 0,002^3}{12} = 1,7 \cdot 10^{-11} m^4 \quad (6.3)$$

$$I_2 = \frac{0,091 \cdot 0,002^3}{12} = 6,1 \cdot 10^{-11} m^4 \quad (6.4)$$

$$I_3 = \frac{0,025 \cdot 0,002^3}{12} = 1,7 \cdot 10^{-11} m^4 \quad (6.5)$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 7,8 \cdot 10^{-11} m^4 \quad (6.6)$$

Rastezna čvrstoća za čelik iznosi $460 \cdot 10^6$ N/m². [6] Vrijednost y iznosi 0,002/2. Uvrštavanjem vrijednosti u izraz (6.1) dobije se vrijednost momenta inercije:

$$M = 35,88 \text{ Nm} \quad (6.7)$$

Na temelju izračunatog momenta inercije i vrijednosti rasteznih čvrstoća za svaku vrstu kompozitne tvorevine određuje se debljina ispitne ploče. Uvrštavanjem momenta inercije (6.7) i vrijednosti rastezne čvrstoće za kompozitnu tvorevinu od staklenih vlakana $R_m = 360 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ [43] u izraz (6.1):

$$\frac{35,88Nm}{0,025m \cdot d_1^3} = \frac{360 \cdot 10^6 \text{ N} / \text{m}^2}{\frac{d_1}{2}} \quad (6.8)$$

dobije se $d_1 = 4,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}$,

$$\frac{35,88}{0,091 \cdot d_2^3} = \frac{360 \cdot 10^6}{\frac{d_2}{2}} \quad (6.9)$$

$d_2 = 2,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, te $d_3 = d_1 = 4,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, odnosno:

$$d = (d_1 + d_2 + d_3) / 3 = 4,11 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6.10)$$

Ponavljanjem postupka za kompozitnu tvorevinu od ugljičnih i aramidnih vlakana čija rastezna čvrstoća iznosi $404,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ [44] dobije se:

$$d = (4,62 \cdot 10^{-3} + 2,42 \cdot 10^{-3} + 4,62 \cdot 10^{-3}) / 3 = 3,89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6.11)$$

Ponavljanjem postupka za kompozitnu tvorevinu od ugljičnih i staklenih vlakana čija rastezna čvrstoća iznosi $440 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ [26] dobije se:

$$d = (4,4 \cdot 10^{-3} + 2,3 \cdot 10^{-3} + 4,4 \cdot 10^{-3}) / 3 = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6.12)$$

Na temelji izračunatih vrijednosti (6.10), (6.11) i (6.12) za debljinu ispitnih ploča uzeta je debljina $d = 4 \text{ mm}$.

Postupak izrade započinje pripremom koja se sastoji od nekoliko bitnih koraka. Svaki korak mora se u potpunosti ispravno izvršiti kako bi dobili kvalitetan izradak. Prije same pripreme potrebno je detaljno razraditi svaki korak, odnosno odlučiti koliko slojeva ojačavala, količine smole i ubrzavala će se upotrijebiti kako bi vrijeme izrade bilo što brže. Također, važno je naglasiti da se pri pripremi i samoj izradi mora koristiti zaštitna odjeća, kuta i rukavice.

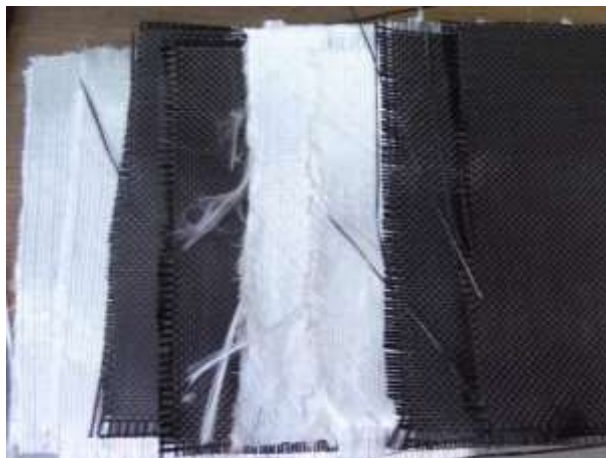
Prvi korak sastoji se od krojenja i rezanja ojačavala - tkanja prema željenim dimenzijama ispitne ploče. U ovom radu sva su tkanja rezana na dimenziju 200 mm x 200 mm. Prva vrsta ispitne ploče izrađena je od staklenih vlakana u obliku triaksijalne tkanine 0/45/45, druga od ugljičnih vlakana u obliku običnog tkanja i aramidnih vlakana u obliku saten tkanja, a treća od ugljičnih vlakana u obliku običnog tkanja i staklenih vlakana u obliku triaksijalne tkanine 0/45/45. U tablici 6.1 prikazana su svojstva upotrebljenih vlakana.

Tablica 6.1. Svojstva upotrebljenih vlakana

	Staklena vlakna	Ugljična vlakna	Aramidna vlakna
Uzorak tkanja	Triaksijalna tkanina 0/45/45	Obično tkanje	Saten tkanje
Plošna masa tkanine	-	200 g/m	170 g/m
Debljina tkanine	0,6 mm	0,2 mm – 0,25 mm	0,18 mm

Pri krojenju je potrebno dobro iskoristiti svaki dio tkanja (bale) iz kojeg se izrezuje. To je vrlo bitno zbog toga što se na taj način iskorištava većina materijala s minimalnim gubicima. Rezanje tkanja zahtijeva preciznost i pažnju s obzirom da se vlakna mogu lako odvojiti od ruba rezanja. Ukoliko se vlakna odvoje od izrezanog tkanja ona postaju škart, a dimenzije izrezanog tkanja se smanjuju. Posebnu pažnju potrebno je izdvojiti za rezanje ugljičnih vlakana pod kutem od 45°, te aramidnih vlakana koja se režu električnim škarama zbog svoje visoke žilavosti.

Slika 6.2 prikazuje izrezana staklena i ugljična tkanja za treću ispitnu ploču.



Slika 6.2. Izrezana staklena i ugljična tkanja

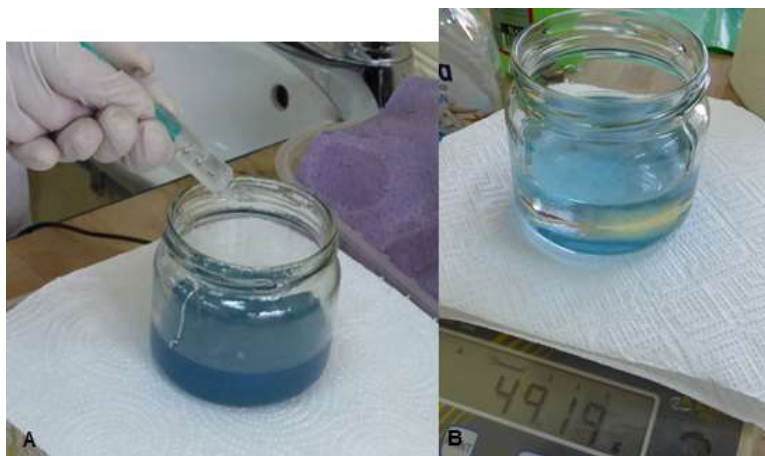
Drugi korak sastoji se od čišćenja kalupa otapalom kako bi se uklonili ostaci smole i vlakana koji su ostali od prethodne izrade. Kao otapalo upotrebljava se aceton koji se nanosi pamučnom krpicom. Kalup za izravno prešanje (slika 6.3) sastoji se od ravne gornje i donje polovice, a izrađen je od čelika. Na rubu donje polovice kalupa nalaze se vijci uz pomoću kojih se kalup zatvara, te time ostvaruje potreban pritisak prešanja na izradak. Na vijke se stavljaju pločice debljine 4 mm kako bi se osigurala potrebna debljina izratka. Na rubu gornje polovice kalupa nalaze se rupe potrebne veličine kako bi vijci prošli kroz njih. Svaki se vijak učvršćuje pomoću matice.



Slika 6.3. Kalup za izravno prešanje

Zatim se na kalup nanosi odvajalo kako bi se izradak lakše odvojio od kalupa. Kao odvajalo koristi se vosak, kojim se istovremeno štiti kalup od smole, te se popunjavaju nepravilnosti na površini kalupa. Vosak se nanosi pomoću spužvice u jednom tankom sloju. Nakon deset minuta sušenja potrebno je dobro ispolirati površinu kalupa pamučnom krpom.

Treći korak sastoji se od pripreme odgovarajuće smole i umreživala. Za ovu pripremu potrebno je izmjeriti određenu količinu smole i umreživala, te ih dobro pomiješati. Za prvu ispitnu ploču upotrebljena je poliesterska smola, a za drugu i treću ispitnu ploču epoksidna smola. Za izradu prve ispitne ploče upotrebljena je mješavina od 150 g poliesterske smole i 3 g umreživala. Iznos 3 g određen je izračunom da količina umreživala mora iznositi 2 % od ukupne količine smole. [45] Za izradu druge i treće ispitne ploče maseni udjeli miješanja epoksidne smole i umreživala moraju biti u odnosu 2,5:1. [1] To znači da na 210 g mješavine 150 g smjese čini epoksidna smola, a ostalih 60 g umreživalo. Za izradu druge i treće ploče upotrebljena je smjesa od 210 g. Za pravilno umreživanje matrice potrebno je zadovoljiti masene udjele konstituenata, pa je miješanje matrice provedeno na vagi. Slika 6.4.a prikazuje pripremu poliesterske smole, a slika 6.4.b prikazuje pripremu epoksidne smole. Važno je napomenuti da je potrebno tako pripremljenu matricu dobro izmiješati dok smjesa ne poprimi homogeni izgled.



Slika 6.4. Priprema: a) poliesterske smole i umreživala, b) epoksidne smole i umreživala

Nakon ovakve pripreme postupak izrade kompozitnih ploča može započeti. Za svaku ispitnu ploču određen je raspored slaganja vlakana kako bi se postigla bolja svojstva. U tablicama 6.2, 6.3 i 6.4 prikazani su rasporedi slaganja vlakana za svaku vrstu ispitne ploče prema izračunatoj debljini ploče od 4 mm i debljinama pojedinog tkanja prema tablici 6.1.

Tablica 6.2. Raspored slaganja staklenih vlakana

Redni broj slaganja vlakana	Tip vlakna	Rotacija vlakna	Postignuta debljina ploče
1.	Staklena	0 °	4 mm
2.	Staklena	0 °	
3.	Staklena	0 °	
4.	Staklena	0 °	
5.	Staklena	0 °	
6.	Staklena	0 °	

Tablica 6.3. Raspored slaganja ugljičnih i aramidnih vlakana

Redni broj slaganja vlakana	Tip vlakana	Rotacija vlakana	Postignuta debljina ploče
1.	Ugljična	0 °	4 mm
2.	Ugljična	0 °	
3.	Ugljična	45 °	
4.	Ugljična	45 °	
5.	Aramidna	90 °	
6.	Aramidna	90 °	
7.	Aramidna	90 °	
8.	Aramidna	90 °	
9.	Ugljična	45 °	
10.	Ugljična	45 °	
11.	Ugljična	0 °	
12.	Ugljična	0 °	

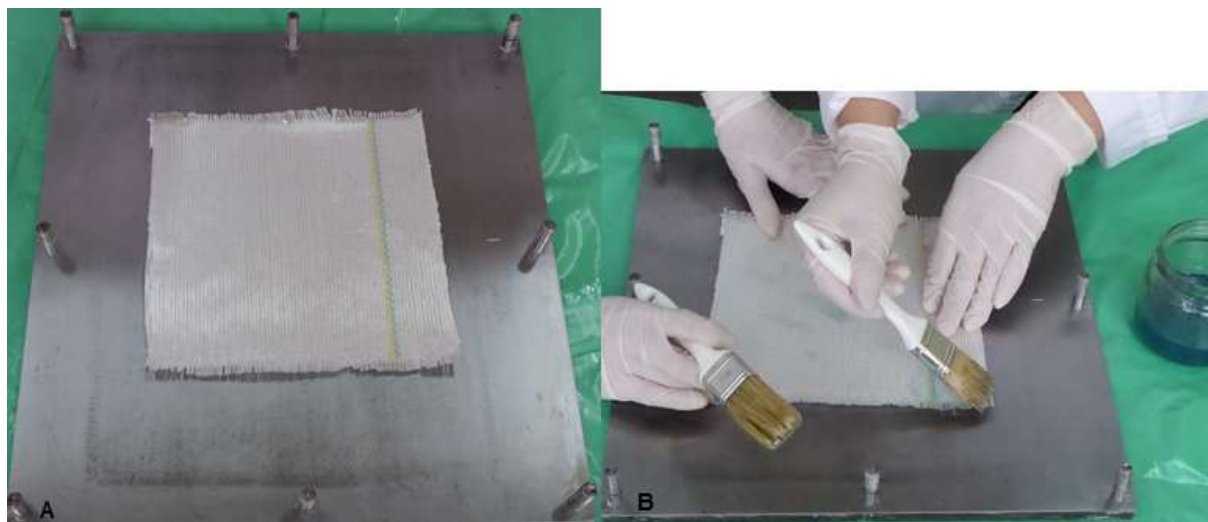
Tablica 6.4. Raspored slaganja ugljičnih i staklenih vlakana

Redni broj slaganja vlakana	Tip vlakana	Rotacija vlakana	Postignuta debljina ploče
1.	Ugljična	0 °	4 mm
2.	Ugljična	0 °	
3.	Staklena	0 °	
4.	Staklena	0 °	
5.	Ugljična	0 °	
6.	Ugljična	0 °	
7.	Staklena	0 °	
8.	Staklena	0 °	

U prvoj ispitnoj ploči svi slojevi staklenih vlakana slažu se pod kutem od 0°, dok su niti u tkanini orijentirana u tri smjera. Prva nit tkanja orijentirana je pod kutem od 0°, druga pod 45°, a treća nit pod - 45°. U drugoj ispitnoj ploči ugljična vlakna se slažu s vanjske strane pod kutem od 0° i 45°, a aramidna vlakna u unutrašnjost pod kutem od 0°. Aramidna vlakna stavljaju se u unutrašnjost zbog povećanja žilavosti, a zakretanjem ugljičnih vlakana izvana postiže se viša čvrstoća izratka. U trećoj ploči staklena vlakna slažu se pod 0°, kao i ugljična.

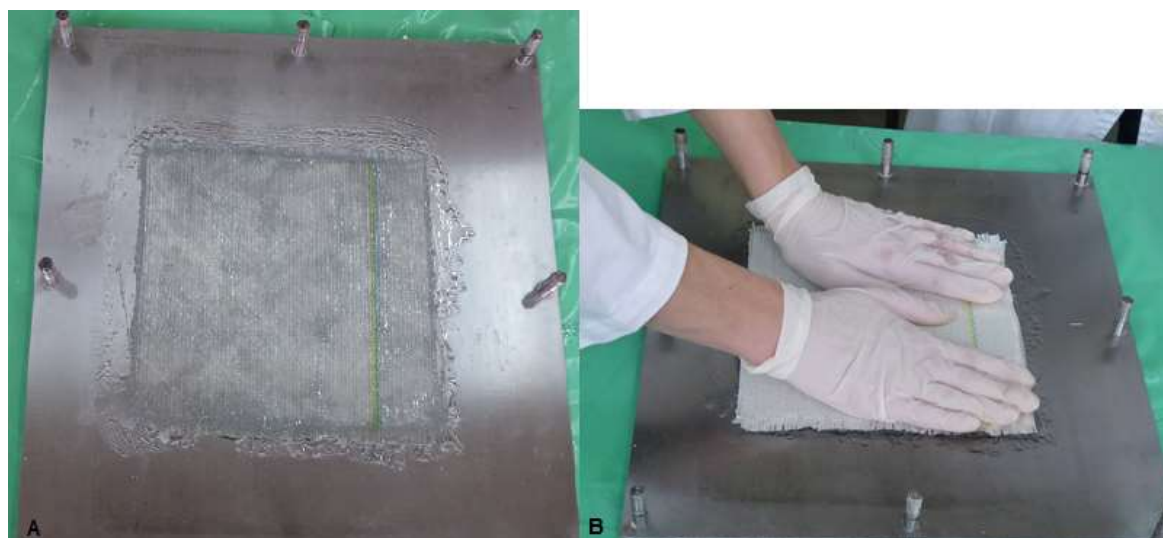
Na donju polovicu kalupa polaže se prvi sloj vlakana koji se zatim mora dobro natopiti smolom. Smola se nanosi kistom tako da se njime utiskuje u tkanje kako bi se što bolje impregnirala s vlaknima, te kako bi se uklonio zrak zadržan između slojeva tkanja. Natapanje tkanja smolom najvažniji je dio izrade koji izravno utječe na kvalitetu izratka. Važno je raditi sporo kako bi se tkanje dobro natopilo smolom, ali i brzo kako smola ne bi umrežila prije vremena. Ukoliko smola umreži prije vremena, ostatak tkanja nije moguće natopiti drugom smolom jer se neće povezati s onima koja su već umrežila. Na taj način dobije se škart, te je potrebno napraviti nove ploče. Vrijeme umreživanja ovisi o količini umreživala. Zbog toga je potrebno iskustvo i strpljenje pri izradi.

Slika 6.5. prikazuje polaganje i natapanje prvog sloja staklenih vlakana pri izradi prve ispitne ploče.



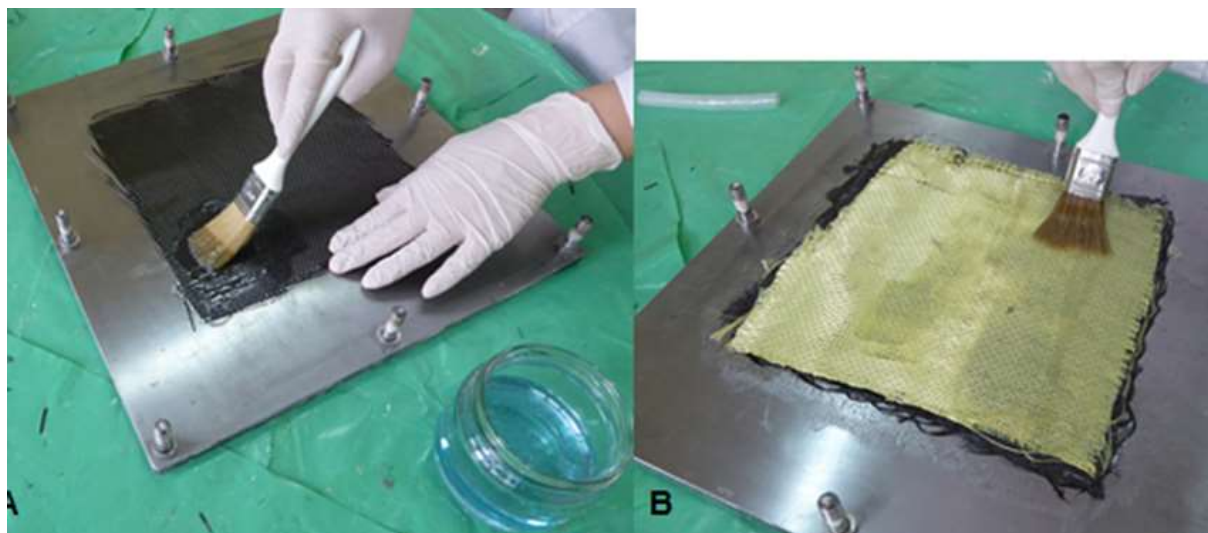
Slika 6.5. Izrada prve ploče: a) polaganje prvog sloja vlakana na donju polovicu kalupa, b) njegovo natapanje smolom

Nakon što je prvi sloj vlakana dobro natopljen smolom na njega se polaže drugi sloj vlakana (slika 6.6). Drugi sloj vlakana mora se također dobro natopiti smolom. U ovom djelu izrade važno je kistom dobro istisnuti sav zarobljen zrak između prvog i drugog sloja tkanja. Postupak se ponavlja sve dok se ne natope svi slojevi vlakana.



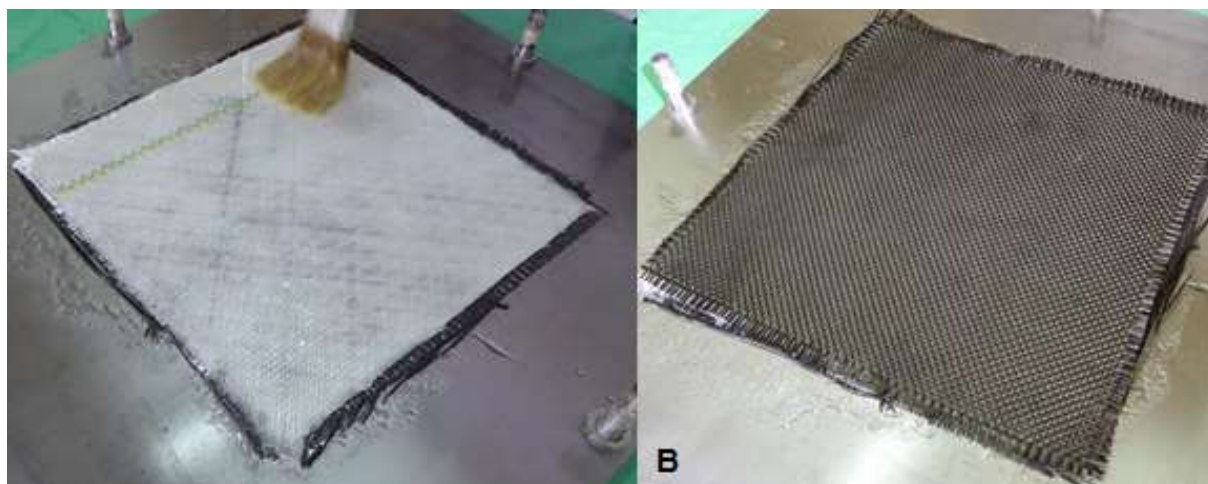
Slika 6.6. Izrada prve ploče: a) natopljen prvi sloj tkanja, b) polaganje drugog sloja tkanja

Slika 6.7.a prikazuje natapanje prvog sloja ugljičnih vlakana, a slika 6.7.b natapanje petog sloja vlakana kojeg čine aramidna vlakna pri izradi druge ispitne ploče.



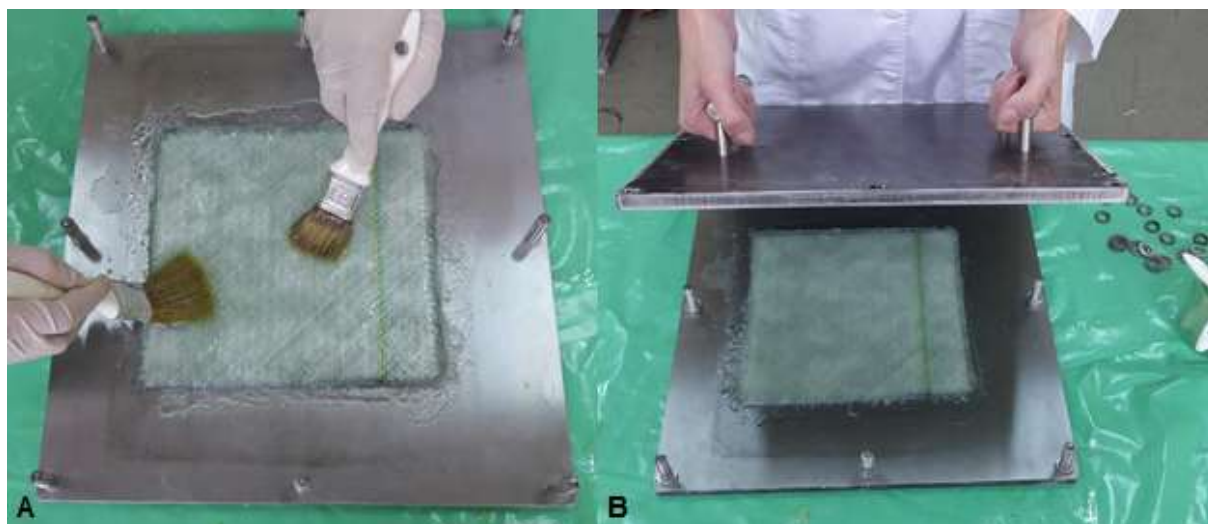
Slika 6.7. Izrada druge ploče: a) natapanje prvog sloja ugljičnih vlakana, b) natapanje petog sloja aramidnih vlakana

Slika 6.8.a prikazuje natapanje trećeg sloja vlakana kojeg čine staklena vlakna, a slika 6.8.b polaganje petog sloja vlakana kojeg čine ugljična vlakna pri izradi treće ispitne ploče.



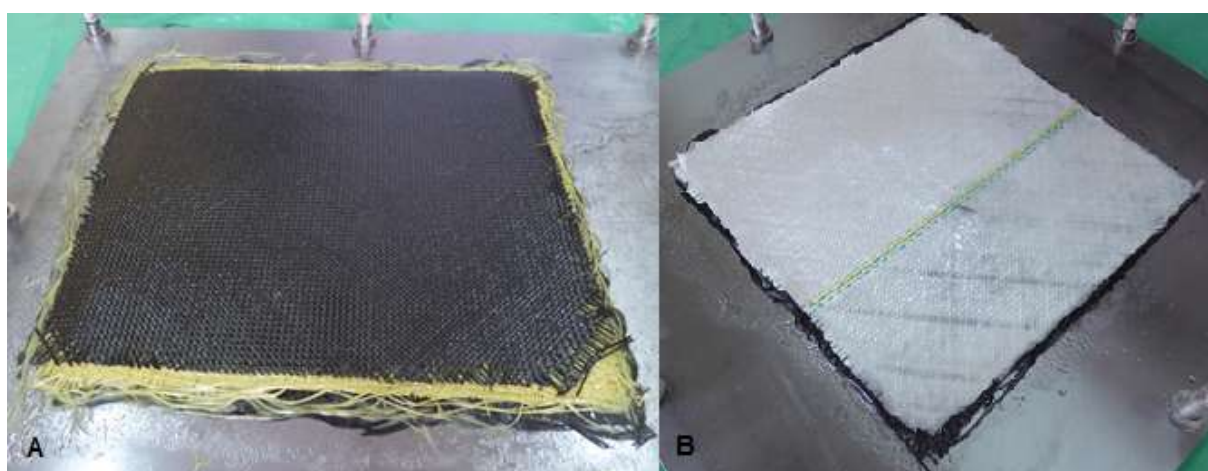
Slika 6.8. Izrada treće ploče: a) natapanje trećeg sloja vlakana, b) polaganje petog sloja ugljičnih vlakana

Nakon što je zadnji sloj vlakana dobro natopljen smolom (slika 6.9.a), slijedi zatvaranje kalupa (slika 6.9.b). Na slici 6.9.a prikazan je zadnji sloj natopljenih staklenih vlakana pri izradi prve ispitne ploče.



Slika 6.9. Izrada prve ploče: a) natopljen zadnji sloj staklenih vlakana, b) zatvaranje kalupa

Na slici 6.10.a prikazan je zadnji natopljeni sloj ugljičnih vlakana pri izradi druge ispitne ploče. Na slici 6.10.b prikazan je zadnji sloj natopljenih staklenih vlakana pri izradi treće ispitne ploče.



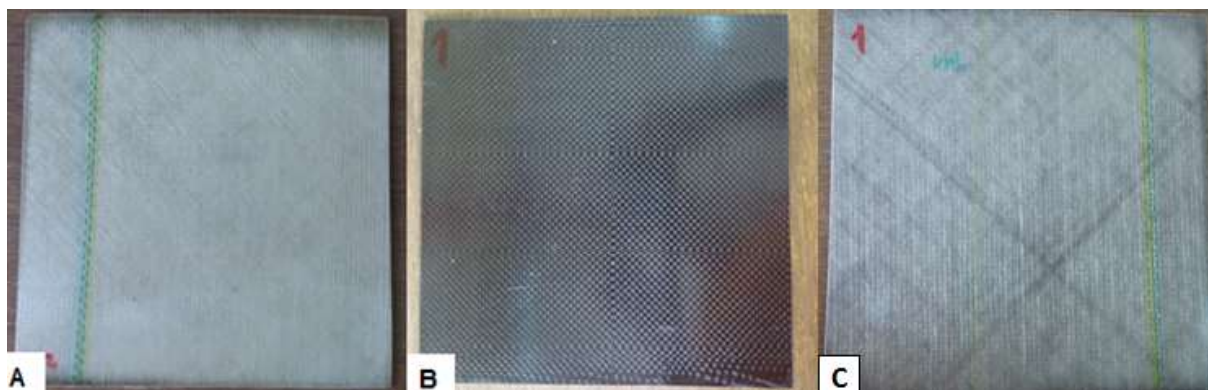
Slika 6.10. Izrada ploča: a) natopljen zadnji sloj ugljičnih vlakana, b) natopljen zadnji sloj staklenih vlakana

Tako pripremljeni kompozit u zatvorenom kalupu stavlja se u peć pri 30 °C u trajanju od 24 sata kako bi umrežio. Kalup se stavlja u kadicu kako ne bi višak smole uslijed pritiska ploča iscurio u peć. Slika 6.11 prikazuje peć upotrebljenu u izradi ispitnih ploča.



Slika 6.11. Peć: a) kalup u unutrašnjosti peći, b) zatvorena peć

Nakon vađenja kalupa iz peći slijedi njegovo otvaranje i pažljivo vađenje gotove ispitne ploče. Na svakoj ispitnoj ploči potrebno je napraviti završnu obradu, odnosno odrezati rubove kako bi dobili ispitnu ploču dimenzija 200 mm x 200 mm. Na slici 6.12 prikazane su izrađene sve tri ispitne ploče. Tako pripremljene ispitne ploče spremne su za ispitivanje.



Slika 6.12. Ispitne ploče: a) prva ploča: staklena vlakna s poliesterskom smolom, b) druga ploča: ugljična i aramidna vlakna s epoksidnom smolom, c) treća ploča: ugljična i staklena vlakna s epoksidnom smolom

U tablici 6.5 prikazana je masa i debljina svake vrste ispitnih kompozitnih ploča izmjerenih nakon završne obrade rezanja na potrebnu dimenziju 200 mm x 200 mm.

Tablica 6.5. Masa i debljina ispitnih kompozitnih ploča

Vrsta ispitne ploče	Masa, g	Debljina, mm				
Prva vrste ispitne ploče – broj 1	356,60	4,35	4,24	4,14	4,37	4,26
Prva vrste ispitne ploče – broj 2	345,65	4,11	4,13	4,22	4,18	4,20
Prva vrste ispitne ploče – broj 3	353,62	4,35	4,30	4,29	4,31	4,36
Prva vrste ispitne ploče \bar{x}	351,96	4,30				
Standardna devijacija, S	4,62	0,09				
Druga vrste ispitne ploče – broj 1	232,96	4,0	4,15	4,08	4,09	4,11
Druga vrste ispitne ploče – broj 2	236,02	4,12	4,15	4,17	4,13	4,15
Druga vrste ispitne ploče – broj 3	238,62	4,20	4,18	4,13	4,14	4,16
Druga vrste ispitne ploče	235,87	4,13				
Standardna devijacija, S	2,31	0,05				
Treća vrsta ispitne ploče – broj 1	295,10	4,07	4,14	4,04	4,11	4,09
Treća vrsta ispitne ploče – broj 2	296,02	4,10	4,06	4,01	4,01	4,04
Treća vrsta ispitne ploče – broj 3	295,78	4,0	4,07	4,06	4,04	4,01
Treća vrsta ispitne ploče	295,63	4,06				
Standardna devijacija, S	0,39	0,04				

6.3. Svojstva poliuretanske pjene

Za ispitivanje je upotrebljena poliuretanska pjena gustoće 60 kg/m^3 , 80 kg/m^3 i 100 kg/m^3 u tri različite debljine 10 mm, 15 mm i 20 mm. U tablici 6.6. prikazana su svojstva upotrebljene poliuretanske pjene prema planu pokusa.

Tablica 6.6. Svojstva poliuretanske pjene

Svojstvo	Memorijska pjena				
Gustoća, kg/m^3	60		80	100	
Debljina, mm	10	20	15	10	20

Slika 6.13 prikazuje upotrebljene poliuretanske pjene različitih gustoća i debljina (gustoća/debljina). Redom od dna prema vrhu: ploča gustoće 60 kg/m^3 i debljine 10 mm, ploča gustoće 60 kg/m^3 i debljine 20 mm, ploča gustoće 80 kg/m^3 i debljine 15 mm, ploča gustoće 100 kg/m^3 i debljine 10 mm, ploča gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm.



Slika 6.13. Poliuretanske pjene različitih gustoća i debljina upotrebljene u pokusu

6.4. Opis ispitivanja

Ispitivanje je provedeno na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje* u Zagrebu, u Laboratoriju za preradbu polimera i drva. Upotrebene su izrađene tri vrste ispitnih kompozitnih ploča (od svake vrste po tri ploče), te poliuretanske pjene određene gustoće i debljine.

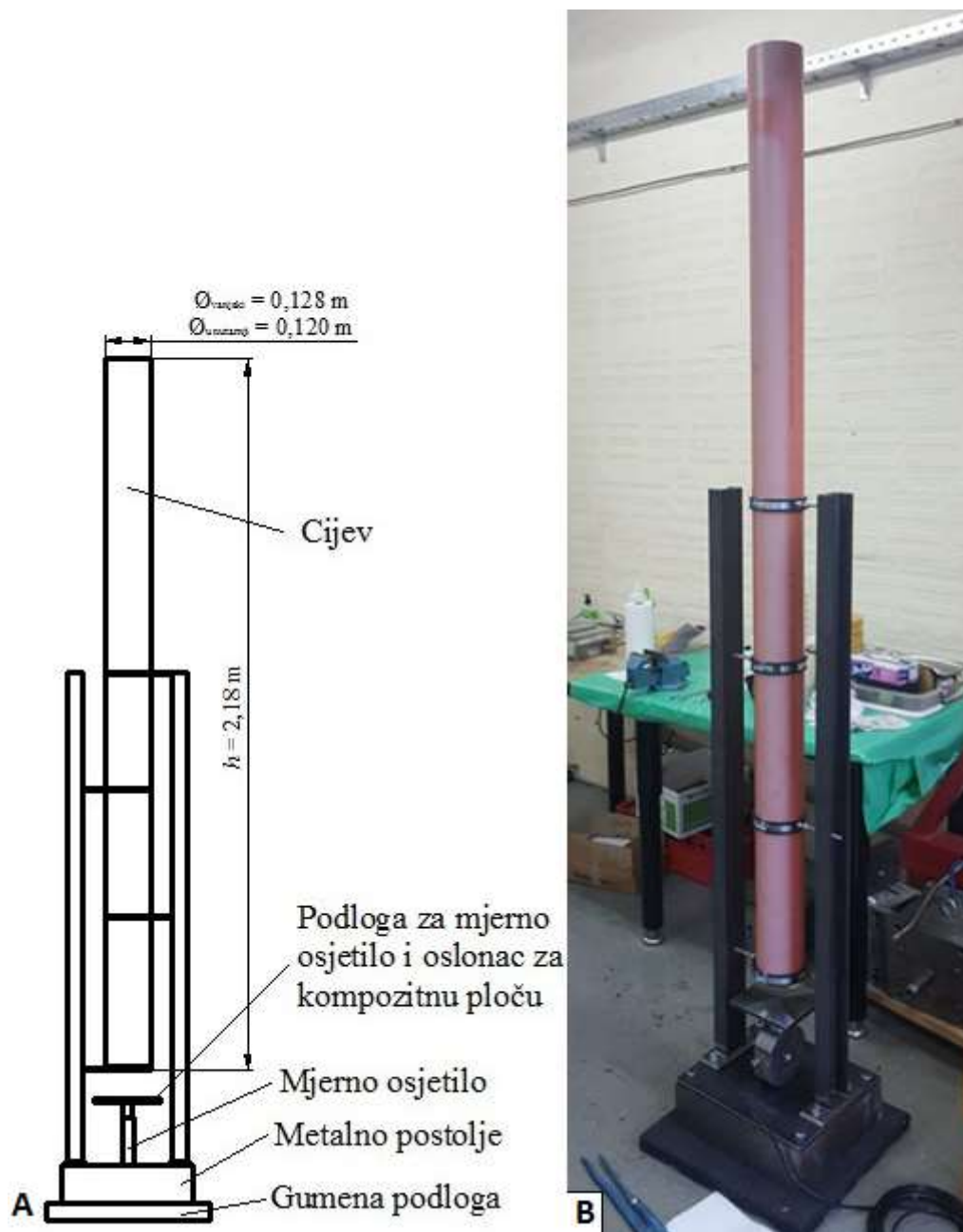
U automobilskoj se industriji ispitivanja apsorpcije udarne energije u braniku pri naletu na pješaka provode bočnim udaranjem odgovarajućeg udarača u branik, kako je to opisano u poglavlju 4.3. Takva ispitivanja zahtijevaju skupu opremu a većina njih provodi se na stvarnim automobilima, što dodatno povećava troškove. Na temelju drugih istraživanja i radova, ispitivanje je provedeno gravitacijskim udaranjem utega na ravnu kompozitnu ploču i poliuretansku pjenu. Za ispitivanje je upotrebljen ravni uteg za udaranje, no postoje istraživanja sa zakrivljenim utegom polumjera 10 mm, ali u ovom ispitivanju nije primijenjen. [46, 47]

Uteg za ispitivanje prikazan je na slici 6.14, a izrađen je od aluminija pri čemu njegova masa iznosi 2,64 kg, visina 115 mm, te promjer 117 mm.



Slika 6.14. Udarni uteg mase 2,64 kg

Ispitivanje nije provedeno standardno na odgovarajućoj skupoj opremi, nego na postavu prema slici 6.15. Postav se sastoji od gumene podloge, metalnog postolja, mjernog osjetila, podloge za mjerno osjetilo, te polimerne cijevi i držača. Polimerna cijev visoka je 2,18 m, a kroz nju se baca udarni uteg. Slika 6.15.a prikazuje shemu postava za ispitivanje, a slika 6.15.b izrađen postav za ispitivanje.



Slika 6.15. Postav za ispitivanje: a) shema postava, b) izrađen postav

Ispitivanje se provodi tako da se na mjerno osjetilo *National Instruments NX 1305* (slika 6. 16) mjernog područja 100 000 N koje mjeri silu udara, slobodnim padom pušta udarni uteg. Na mjernom osjetilu nalazi se podloga mjerne stanice na koju se stavljaju određene ispitne ploče i poliuretanske pjene.



Slika 6.16. Mjerno osjetilo *National Instruments NX 1305*

Visina slobodnog pada iznosi 2,065 m, a određena je visinom cijevi 2,18 m minus visina utega. Parametri pokusa su tako podešeni da izlazna energija (6.13) iznosi 53,48 J.

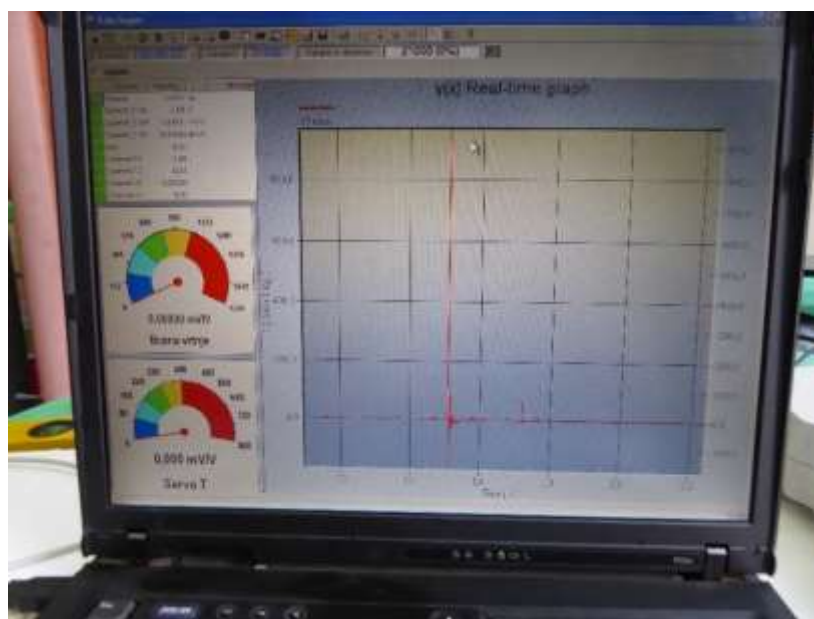
$$E = m \cdot g \cdot h \quad (6.13)$$

gdje je: E - energija (J),
 m - masa udarnog utega (kg),
 g - ubrzanje zemljine sile teže (m/s^2),
 h - visina (m).

Ispitivanje svake vrste ispitnih kompozitnih ploča provedeno je prema faktorskom planu pokusa (tablica 6.7), a rezultati su praćeni u programu *Catman ver. 05* (slika 6.17).

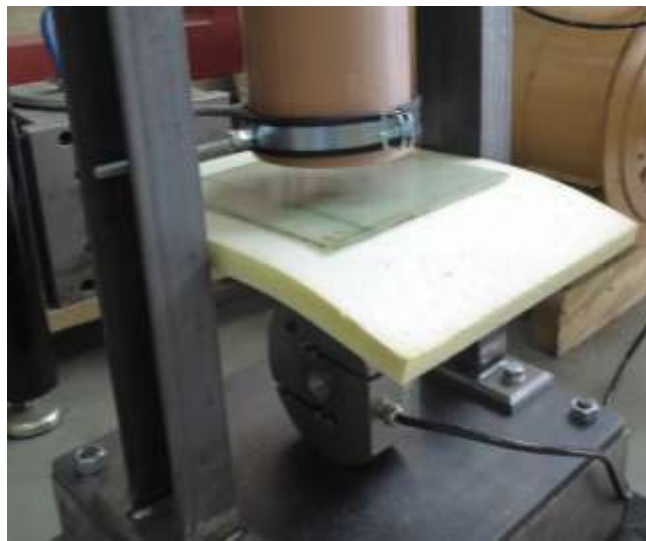
Tablica 6.7. Faktorski plan pokusa

Faktorski plan pokusa							
Poliuretanska pjena gustoća/debljina kg/m ³ / mm	80/15	60/20	80/15	60/10	80/15	100/20	100/10
Redni broj mjerenja	1	2	3	4	5	6	7

**Slika 6.17. Program Catman ver. 05**

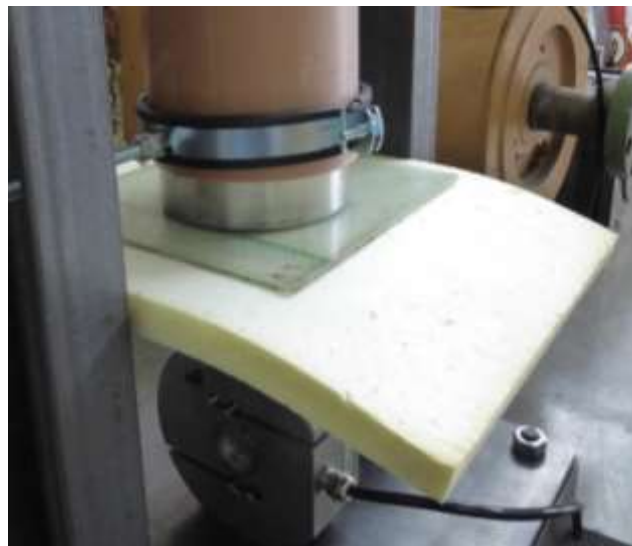
Ispitivanje svake vrste ispitne ploče sastoji od sedam različitih mjerenja ovisno o gustoći i debljini upotrebljene poliuretanske pjene, a svako mjerenje ponovljeno je pet puta kako bi se mogla dobiti srednja vrijednost rezultata. Također, ispitivanje je provedeno na svakoj vrsti ispitne ploče bez upotrebe poliuretanske pjene.

Ispitivanje započinje stavljanjem određene poliuretanske pjene i ispitne ploče na podlogu za mjerno osjetilo. Na nju se najprije stavlja poliuretanska pjena, a zatim ispitna ploča (slika 6.18). Odluka da uteg udara o kompozitnu ploču, a ne u poliuretansku pjenu određena je pretpostavkom gdje su manje sile zabilježene kod udara u kompozitnu ploču.



Slika 6.18. Priprema ispitivanja

Zatim se uteg baca slobodnim padom kroz cijev s visine 2,065 m. Program *Catman ver. 05* mjeri masu m u kg u ovisnosti o vremenu. Slika 6.19 prikazuje završeno ispitivanje nakon što uteg udari u ispitnu ploču i poliuretansku pjenu.



Slika 6.19. Završeno ispitivanje

6.5. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablicama 9.1 – 9.3 koje se nalaze u prilogu. U tablici 9.1 prikazani su rezultati ispitivanja za prvu ispitnu ploču (staklena vlakna/poliesterska smola) i poliuretansku pjenu. U tablici 9.2 prikazani su rezultati ispitivanja za drugu ispitnu ploču (ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola) i poliuretansku pjenu. U tablici 9.3 prikazani su rezultati ispitivanja za treću ispitnu ploču (ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola) i poliuretansku pjenu. U tim tablicama rezultati su prikazani u obliku udarne mase m u kilogramima.

Takvi rezultati ispitivanja pomnoženi su s ubrzanjem zemljine sile teže $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ kako bi se mogli prikazati u obliku udarne sile F u N (tablice 9.4 – 9.6 iz priloga).

U tablici 9.5 odbačena su dva rezultata ispitivanja zbog toga što odstupaju od ostalih rezultata, te oni nisu uzeti u obzir pri analizi rezultata.

6.6. Analiza rezultata ispitivanja

Za ispitivanje je odabran faktorski plan pokusa na dvije razine i tri ponavljanja u centru da bi se dobila ponovljivost rezultata. U ispitivanju je ustanovljen utjecaj dva parametra, gustoće (parametar A) i debljine poliuretanske pjene (parametar B), na silu udara. Za analizu rezultata ispitivanja upotrebljen je softverski program *Design Expert*, modul ANOVA (analiza varijance).

Pri analizi varijance za silu F na prvoj ispitnoj ploči (staklena vlakna/poliesterska smola) i poliuretanskoj pjenu isključeno je 3. mjerenje zbog prevelikog odstupanja od ostalih središnjih točaka (vidljivo u tablici 9.4 iz priloga). U tablici 6.8 prikazani su rezultati obrade za silu F na prvoj ispitnoj ploči (staklena vlakna/poliesterska smola) i poliuretanskoj pjenu.

Tablica 6.8. Rezultati analize varijance za silu F na prvoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni

	Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>)	Stupnjevi slobode DF	Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean Square</i>)	Varijabla F (e. <i>F Value</i>)	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>)
Model	$9,397 \cdot 10^6$	3	$3,132 \cdot 10^6$	438,77	0,0351 značajno
A	$1,544 \cdot 10^5$	1	$1,544 \cdot 10^5$	21,63	0,1348
B	$9,209 \cdot 10^6$	1	$9,209 \cdot 10^6$	1289,96	0,0177
AB	$3,365 \cdot 10^4$	1	$3,365 \cdot 10^4$	4,71	0,2748
Odstupanje od modela (e. <i>Curvature</i>)	$2,668 \cdot 10^5$	1	$2,669 \cdot 10^5$	37,37	0,1032 neznačajno
Pogreška (e. <i>Pure error</i>)	$7,138 \cdot 10^3$	1	$7,138 \cdot 10^3$		
Ukupno (e. <i>Cor Total</i>)	$9,671 \cdot 10^6$	5			

Da bi određeni faktor imao utjecaj na promjenu sile vrijednost rizika odbacivanja hipoteze H_0 (e. *Prob > F*) mora biti manja od 0,05. [47] Iz tablice 6.8 vidljivo je da faktor A – gustoća poliuretanske pjene nema značajan utjecaj na promjenu sile, a faktor B – debljina poliuretanske pjene ima značajan utjecaj na promjenu sile. Vidljivo je i da faktori A i B zajedno ne utječu na promjenu sile. Također, iz tablice se može zaključiti da je odstupanje od modela (e. *Curvature*) neznačajno, što znači da je odabrani model dobar.

U tablici 6.9 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu za silu F na prvoj ispitnoj ploči (staklena vlakna/poliesterska smola) i poliuretanskoj pjeni. Koeficijent determiniranosti r^2 (e. *R-squared*) je mjera odstupanja od aritmetičke sredine koja je objašnjena modelom. Što je r^2 bliži vrijednosti 1, to model bolje slijedi podatke.

Koeficijent determiniranosti r^2 računa se prema jednadžbi: [48]

$$r^2 = 1 - \frac{SKO_{ostataka}}{SKO_{modela} + SKO_{ostataka}}, \quad (6.14)$$

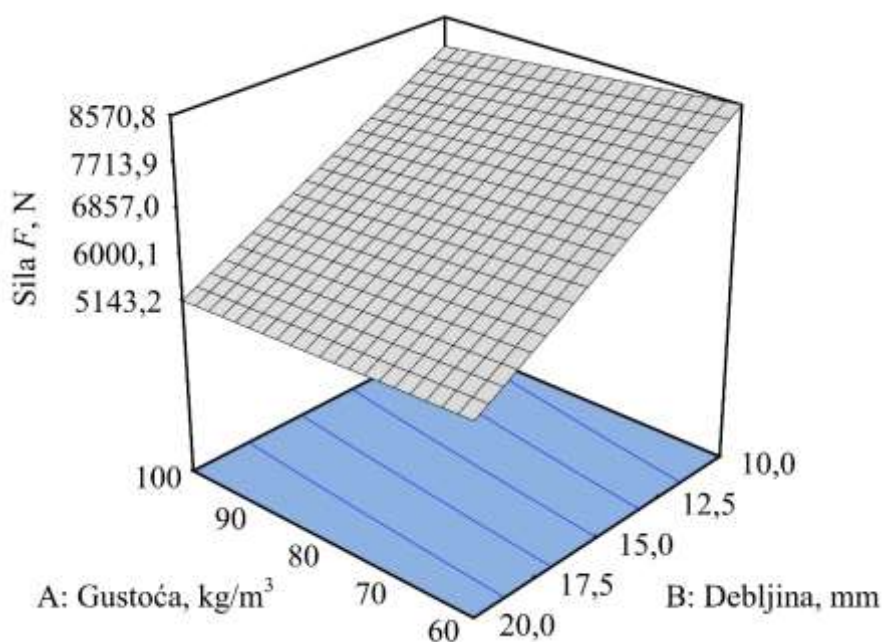
gdje je SKO – suma kvadrata odstupanja.

Tablica 6.9. Osnovni statistički podaci o modelu za silu F na prvoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni

	Sila
Standardno odstupanje (e. <i>Standard deviation</i>)	84,49
Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>)	6914,38
Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R-squared</i>)	0,9992

Iz tablice 6.9 može se zaključiti da model vrlo dobro slijedi podatke s obzirom na to da je koeficijent determiniranosti $r^2 = 0,9992$.

Slika 6.20 prikazuje ovisnost sile za prvu ispitnu ploču (staklena vlakna/poliesterska smola) o gustoći i debljini poliuretanske pjene. Najviše smanjenje sile zabilježeno je pri gustoći od 100 kg/m^3 i uz debljinu 20 mm. Također, na slici se može zaključiti kako faktor B – debljina poliuretanske pjene ima značajan utjecaj na promjenu sile. Utjecaj faktora A – gustoća poliuretanske pjene na promjenu sile je vrlo mali.



Slika 6.20. Ovisnost sile za prvu ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene

Model za silu F na prvoj ispitnoj ploči (staklena vlakna/poliesterska smola) i poliuretanskoj pjeni može se opisati jednadžbom (6.15):

$$y = 13203,85 - 23,58 \cdot \text{gustoća} - 376,84 \cdot \text{debljina} + 0,92 \cdot \text{gustoća} \cdot \text{debljina} \quad (6.15)$$

U tablici 6.10 prikazani su rezultati obrade za silu F na drugoj ispitnoj ploči (ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola) i poliuretanskoj pjeni. Iz tablice 6.10 vidljivo je da faktor A – gustoća poliuretanske pjene nema značajan utjecaj na promjenu sile, a faktor B – debljina poliuretanske pjene ima značajan utjecaj na promjenu sile. Vidljivo je i da faktori A i B zajedno ne utječu na promjenu sile. Također, iz tablice se može zaključiti da je odstupanje od modela (e. *Curvature*) neznačajno.

Tablica 6.10. Rezultati analize varijance za silu F na drugoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni

	Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>)	Stupnjevi slobode DF	Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean Square</i>)	Varijabla F (e. <i>F Value</i>)	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>)
Model	$8,690 \cdot 10^6$	3	$2,897 \cdot 10^6$	40,85	0,0240 značajno
A	$9,947 \cdot 10^4$	1	$9,947 \cdot 10^4$	1,40	0,3580
B	$8,544 \cdot 10^6$	1	$8,544 \cdot 10^6$	120,48	0,0082
AB	$4,645 \cdot 10^4$	1	$4,645 \cdot 10^4$	0,66	0,5033
Odstupanje od modela (e. <i>Curvature</i>)	$1,857 \cdot 10^5$	1	$1,857 \cdot 10^5$	2,62	0,2470 neznačajno
Pogreška (e. <i>Pure error</i>)	$1,418 \cdot 10^5$	2	$7,092 \cdot 10^4$		
Ukupno (e. <i>Cor Total</i>)	$9,018 \cdot 10^6$	5			

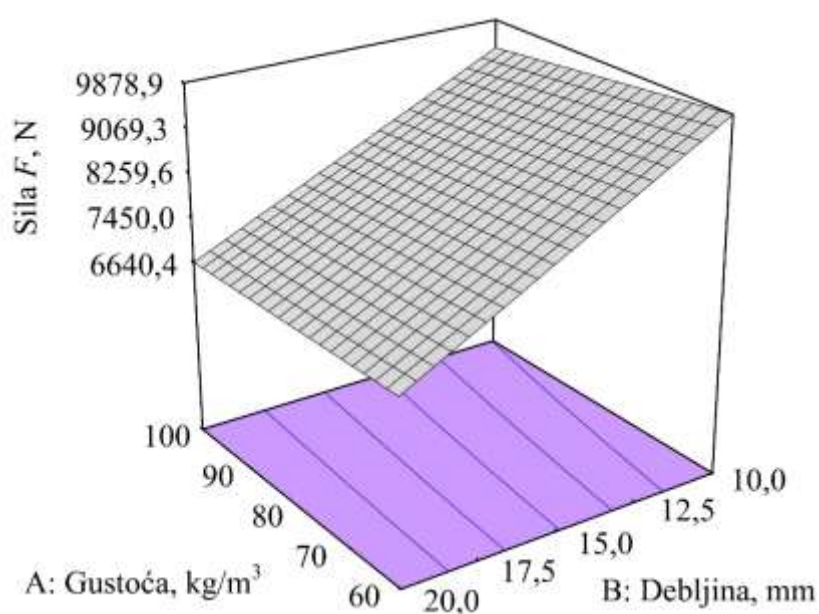
U tablici 6.11 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu za silu F na drugoj ispitnoj ploči (ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola) i poliuretanskoj pjeni.

Tablica 6.11. Osnovni statistički podaci o modelu za silu F na drugoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni

	Sila
Standardno odstupanje (e. <i>Standard deviation</i>)	266,31
Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>)	8292,91
Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R-squared</i>)	0,9839

Iz tablice 6.11 može se zaključiti da model vrlo dobro slijedi podatke s obzirom na to da je koeficijent determiniranosti $r^2 = 0,9839$.

Slika 6.21 prikazuje ovisnost sile za drugu ispitnu ploču (ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola) o gustoći i debljini poliuretanske pjene. Najviše smanjenje sile zabilježeno je pri gustoći od 100 kg/m^3 i uz debljinu 20 mm . Također, na slici se može zaključiti kako faktor B – debljina poliuretanske pjene ima značajan utjecaj na promjenu sile. Utjecaj faktora A – gustoća poliuretanske pjene na promjenu sile je vrlo mali.



Slika 6.21. Ovisnost sile za drugu ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene

Model za silu F na drugoj ispitnoj ploči (ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola) i poliuretanskoj pjeni može se opisati jednadžbom (6.16):

$$y = 14460,46 - 24,05 \cdot \text{gustoća} - 378,52 \cdot \text{debljina} + 1,08 \cdot \text{gustoća} \cdot \text{debljina} \quad (6.16)$$

U tablici 6.12 prikazani su rezultati obrade za silu F na trećoj ispitnoj ploči (ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola) i poliuretanskoj pjeni.

Tablica 6.12. Rezultati analize varijance za silu F na trećoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni

	Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>)	Stupnjevi slobode DF	Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean Square</i>)	Varijabla F (e. <i>F Value</i>)	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>)
Model	$1,001 \cdot 10^7$	3	$3,359 \cdot 10^6$	124,42	0,0080 značajno
A	$9,036 \cdot 10^3$	1	$9,036 \cdot 10^3$	0,33	0,6213
B	$1,007 \cdot 10^7$	1	$1,007 \cdot 10^7$	372,88	0,0027
AB	$1,092 \cdot 10^3$	1	$1,092 \cdot 10^3$	0,04	0,8591
Odstupanje od modela (e. <i>Curvature</i>)	$4,904 \cdot 10^5$	1	$4,904 \cdot 10^5$	18,17	0,0509 neznačajno
Pogreška (e. <i>Pure error</i>)	$5,399 \cdot 10^4$	2	$2,699 \cdot 10^4$		
Ukupno (e. <i>Cor Total</i>)	$1,062 \cdot 10^7$	5			

Iz tablice 6.12 može se zaključiti kao i u slučaju prve i druge ploče da faktor A – gustoća poliuretanske pjene nema značajan utjecaj na promjenu sile, a faktor B – debljina poliuretanske pjene ima značajan utjecaj na promjenu sile. Vidljivo je i da faktori A i B zajedno ne utječu na promjenu sile. Također, iz tablice se može zaključiti da je odstupanje od modela (e. *Curvature*) neznačajno.

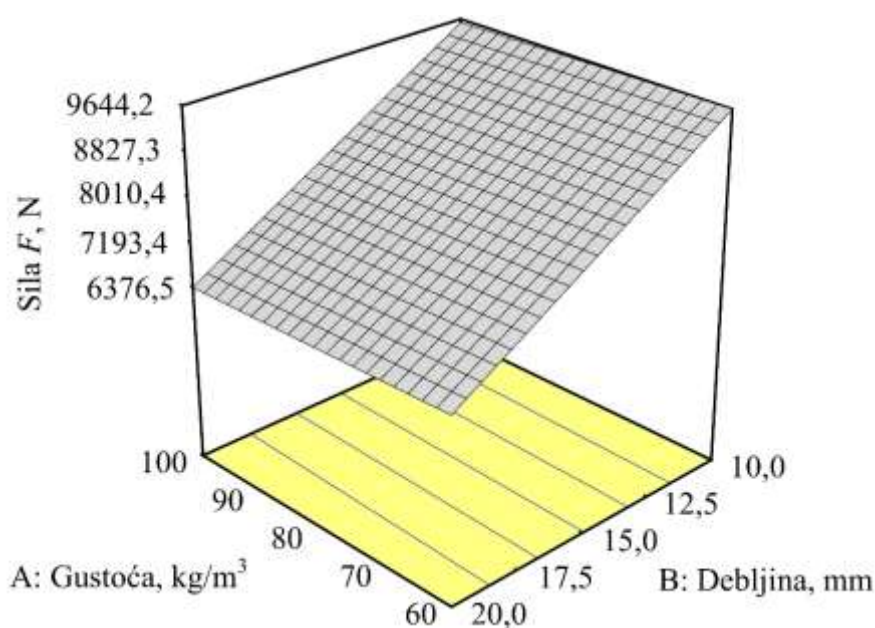
U tablici 6.13 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu za silu F na trećoj ispitnoj ploči (ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola) i poliuretanskoj pjeni.

Tablica 6.13. Osnovni statistički podaci o modelu za silu F na trećoj ispitnoj ploči i poliuretanskoj pjeni

	Sila
Standardno odstupanje (e. <i>Standard deviation</i>)	164,30
Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>)	8256,10
Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R-squared</i>)	0,9947

Iz tablice 6.13 može se zaključiti da model vrlo dobro slijedi podatke s obzirom na to da je koeficijent determiniranosti $r^2 = 0,9947$.

Slika 6.22 prikazuje ovisnost sile za treću ispitnu ploču (ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola) o gustoći i debljini poliuretanske pjene. Najviše smanjenje sile zabilježeno je također pri gustoći od 100 kg/m^3 i uz debljinu 20 mm. Također, na slici se može zaključiti kako faktor B – debljina poliuretanske pjene ima značajan utjecaj na promjenu sile. Utjecaj faktora A – gustoća poliuretanske pjene na promjenu sile je zanemariv.



Slika 6.22. Ovisnost sile za treću ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene

Model za silu F na trećoj ispitnoj ploči (ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola) i poliuretanskoj pjeni može se opisati jednačbom (6.17):

$$y = 12777,62 + 0,10 \cdot \text{gustoća} - 304,04 \cdot \text{debljina} - 0,17 \cdot \text{gustoća} \cdot \text{debljina} \quad (6.17)$$

6.7. Optimiranje

U programskom paketu *Design Expert* također postoji i mogućnost optimiranja, koje se provodi na temelju tzv. funkcije poželjnosti (e. *Desirability*). U postupku optimiranja uzimaju se u obzir želje i prioriteti ispitivača s obzirom na odzivne vrijednosti. Tražena vrijednost odziva može biti maksimalna ili minimalna, upostavljenim granicama, ili točno određene vrijednosti. [49]

U slučaju kada odziv treba biti maksimalan, ako odziv ima vrijednost A (minimalna vrijednost odziva), B (točno određena vrijednost odziva) i C (maksimalna vrijednost odziva), pri čemu je $A \leq B \leq C$, odabire se vrijednost odziva B tako da je $d = 1$ za svaki $\hat{y} > B$. Proizvod nije prihvatljiv ako je $\hat{y} < A$. U tom slučaju $B = C$. [49] Funkcija poželjnosti d definira se prema: [49]

$$d = \left\{ \frac{\hat{y} - A}{B - A} \right\}, A \leq \hat{y} \leq B \quad (6.18)$$

Ako odziv treba biti minimalan, vrijednost B odabire se tako da $\hat{y} < B$ uz $d = 1$. Vrijednost za $\hat{y} > C$ nije prihvatljiva i daje vrijednost $d = 0$. U tom slučaju $A = B$. Funkcija poželjnosti d u tom je slučaju: [49]

$$d = \left\{ \frac{\hat{y} - C}{B - C} \right\}, B \leq \hat{y} \leq C \quad (6.19)$$

Vrijednosti A , B i C biraju se prema željama ispitivača, a vrijednost d prema tome koliko je važno da je vrijednost odziva \hat{y} što bliže B . Funkcija poželjnosti u ovom radu računala se s uobičajenom vrijednošću $d = 1$. [49]

Provedeno je optimiranje ispitivanja za svaku vrstu ispitne kompozitne ploče i poliuretanske pjene. Uvjeti optimiranja su minimalni iznos gustoće, debljine i sile F . Razlog tome je potreba za minimalnom masom sustava branika jer se u automobilskoj industriji teži manjoj masi automobila. U tablici 6.14 navedeni su uvjeti optimiranja za ispitivanje prve ispitne ploče (staklena vlakna/poliesterska smola) i poliuretanske pjene.

Tablica 6.14. Uvjeti optimiranja za ispitivanje prve ispitne ploče i poliuretanske pjene

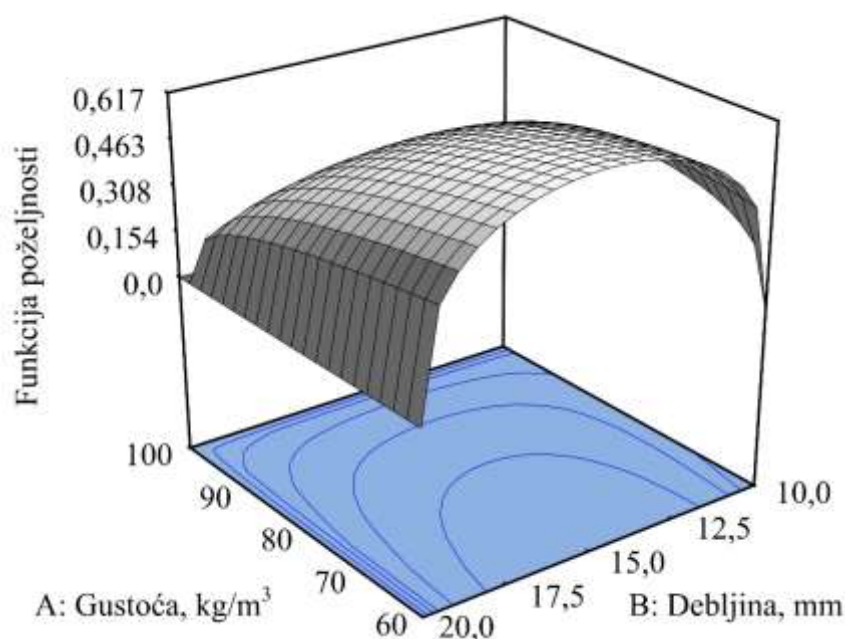
Ime	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Gustoća	minimalna	60	100
Debljina	minimalna	10	20
Sila F	minimalna	5143,19	8570,8

Za zadane uvjete optimiranja softver je pronašao samo jedno rješenje koje je navedeno u tablici 6.15. Optimiranjem je dobivena funkcija poželjnosti $d = 0,6169$ koja nije u potpunosti zadovoljila postavljene uvjete. Uvjet minimalne gustoće u potpunosti je zadovoljen, dok uvjeti debljine i sile F nisu, pa je i za očekivati da će funkcija poželjnosti biti nešto lošija.

Tablica 6.15. Rješenje postupka optimiranja za ispitivanje prve ispitne ploče i poliuretanske pjene

Broj	Gustoća, kg/m^3	Debljina, mm	Sila F , N	Funkcija poželjnosti d
1.	60	15	6962,12	0,6169

Slika 6.23 prikazuje ovisnost sile za prvu ispitnu ploču (staklena vlakna/poliesterska smola) o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja.



Slika 6.23. Ovisnost sile za prvu ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja

U tablici 6.16 navedeni su uvjeti optimiranja za ispitivanje druge ispitne ploče (ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola) i poliuretanske pjene.

Tablica 6.16. Uvjeti optimiranja za ispitivanje druge ispitne ploče i poliuretanske pjene

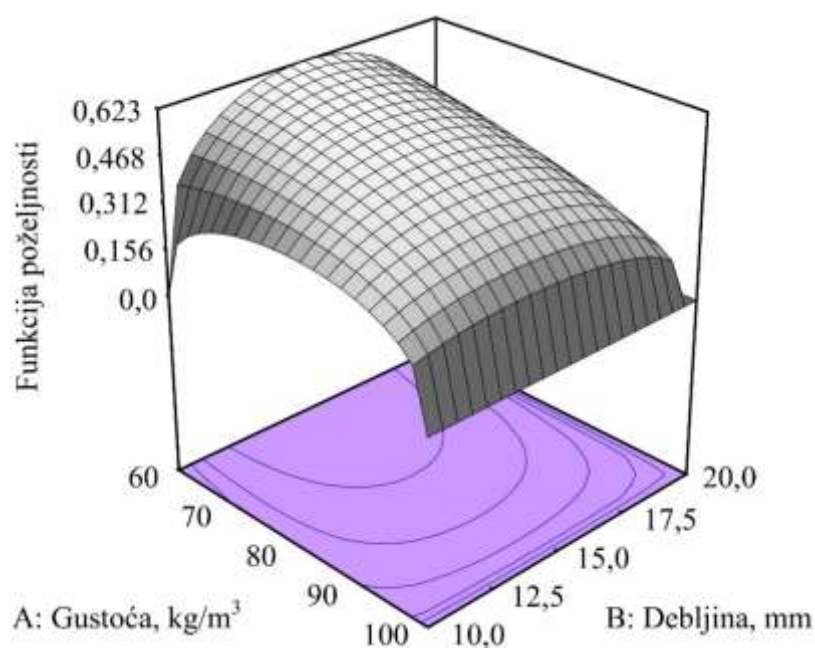
Ime	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Gustoća	minimalna	60	100
Debljina	minimalna	10	20
Sila F	minimalna	6640,39	9878,87

Za zadane uvjete optimiranja softver je pronašao dva rješenja koja su navedena u tablici 6.17. Optimiranjem su dobivene funkcije poželjnosti $d = 0,6234$ i $d = 0,6233$ koje su razlikuju samo u četvrtoj decimali, pa možemo zaključiti da između njih ne postoji razlika. Obje funkcije poželjnosti nisu u potpunosti zadovoljile postavljene uvjete optimiranja. Uvjet minimalne gustoće u potpunosti je zadovoljen u oba rješenja, dok uvjeti debljine i sile F nisu, pa je i za očekivati da će funkcije poželjnosti biti nešto lošije. Iz tablice je vidljivo da se rješenja optimalne debljine i sile F ne razlikuju značajno.

Tablica 6.17. Rješenje postupka optimiranja za ispitivanje druge ispitne ploče i poliuretanske pjene

Broj	Gustoća, kg/m ³	Debljina, mm	Sila F , N	Funkcija poželjnosti d
1.	60	15,0	8309,54	0,6234
2.	60	15,11	8275,33	0,6233

Slika 6.24 prikazuje ovisnost sile za drugu ispitnu ploču (ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola) o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja.

**Slika 6.24. Ovisnost sile za drugu ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja**

U tablici 6.18 navedeni su uvjeti optimiranja za ispitivanje treće ispitne ploče (ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola) i poliuretanske pjene.

Tablica 6.18. Uvjeti optimiranja za ispitivanje treće ispitne ploče i poliuretanske pjene

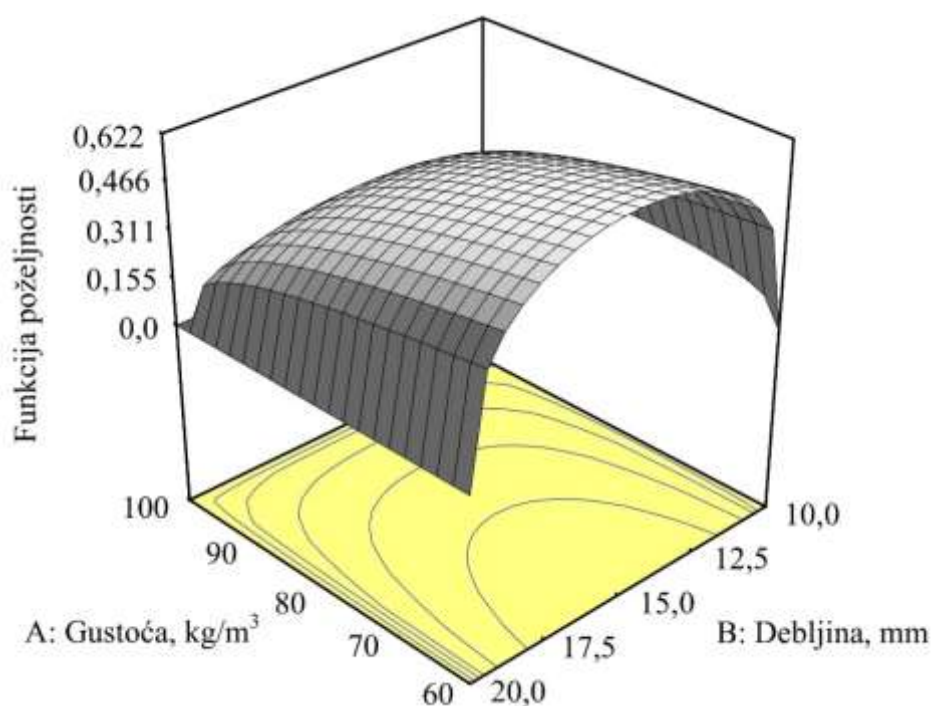
Ime	Cilj	Donja granica	Gornja granica
Gustoća	minimalna	60	100
Debljina	minimalna	10	20
Sila F	minimalna	6376,5	9644,21

Za zadane uvjete optimiranja softver je pronašao samo jedno rješenje koje je navedeno u tablici 6.19. Optimiranjem je dobivena funkcija poželjnosti $d = 0,6216$ koja nije u potpunosti zadovoljila postavljene uvjete. Uvjet minimalne gustoće u potpunosti je zadovoljen, dok uvjeti debljine i sile F nisu, pa je i za očekivati da će funkcija poželjnosti biti nešto lošija.

Tablica 6.19. Rješenje postupka optimiranja za ispitivanje treće ispitne ploče i poliuretanske pjene

Broj	Gustoća, kg/m^3	Debljina, mm	Sila F , N	Funkcija poželjnosti d
1.	60	15	8073,57	0,6216

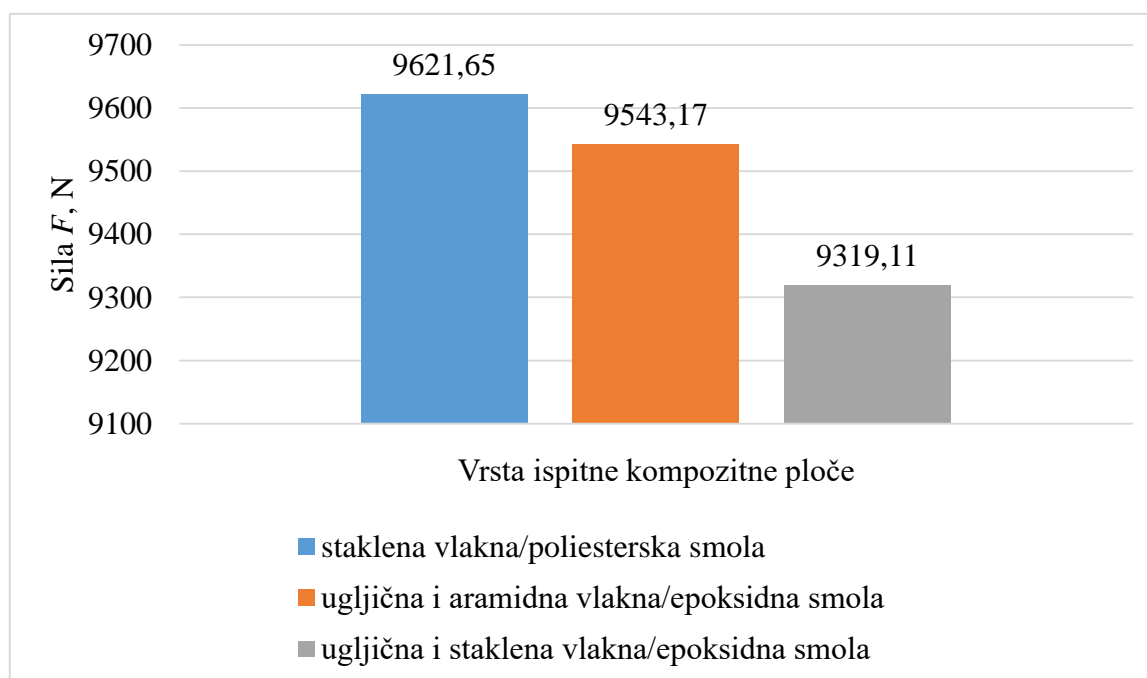
Slika 6.25 prikazuje ovisnost sile za treću ispitnu ploču (ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola) o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja.



Slika 6.25. Ovisnost sile treću ispitnu ploču o gustoći i debljini poliuretanske pjene uz zadane uvjete optimiranja

6.8. Komentar provedenih ispitivanja

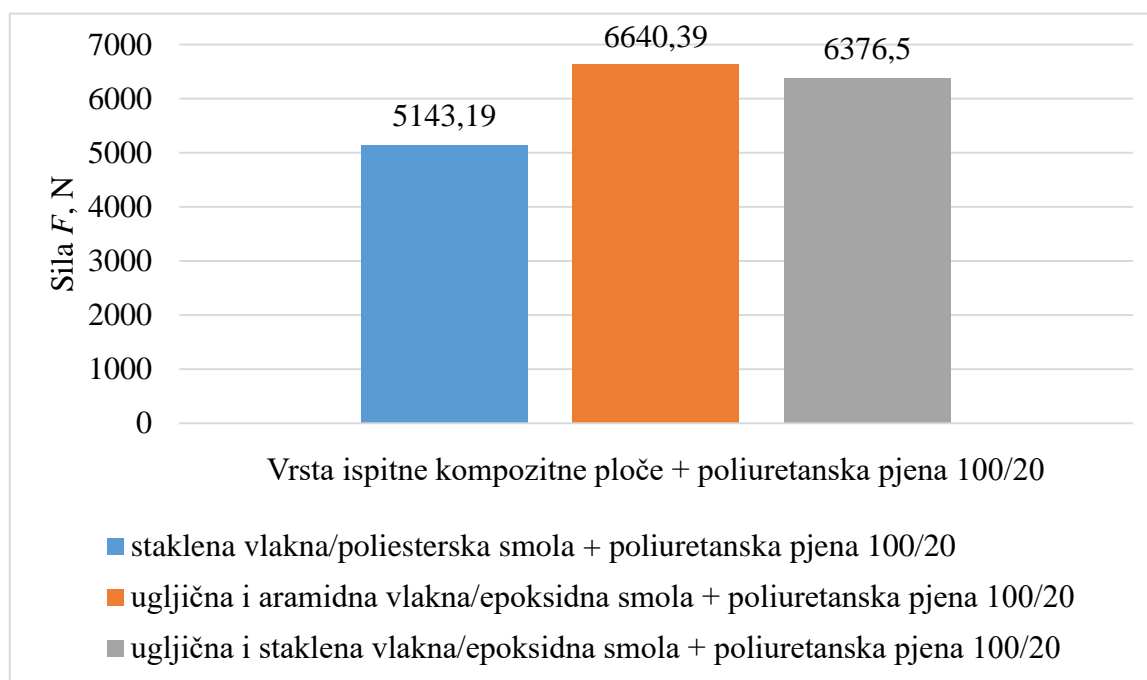
Usporedba rezultata ispitane sile F za sve tri vrste ispitnih kompozitnih ploča bez upotrebe poliuretanske pjene prikazana je na slici 6.26. Sa slike se može zaključiti da prva ispitna ploča od staklenih vlakana i poliesterske smole ima najvišu silu $F = 9621,65$ N, odnosno da treća ispitna ploča od ugljičnih i staklenih vlakana, te epoksidne smole ima najnižu silu $F = 9319,11$ N. Na temelju toga može se zaključiti da treća vrsta kompozitne tvorevine bez upotrebe poliuretanske pjene ima najveću sposobnost apsorpcije udarne energije. Ako se usporede cijene materijala ojačavala, treća vrsta kompozitne tvorevine skuplja je od prve zbog upotrebe ugljičnih vlakana, dok je druga vrsta kompozitne tvorevine najskuplja zbog toga što se upotrebljavaju ugljična i aramidna vlakna.



Slika 6.26. Usporedba rezultata sile F ispitnih na pločama bez poliuretanske pjene

Usporedbom rezultata ispitane sile F za sve tri vrste ispitnih kompozitnih ploča s upotrebom poliuretanske pjene može se zaključiti da jedino faktor debljine ima značajan utjecaj na promjenu sile F . Nadalje, može se zaključiti da faktor gustoće nema značajan utjecaj na promjenu sile F , ali da je sila ipak manja kod većih gustoća, što je i za očekivati. Na temelju toga može se zaključiti da najbolje rezultate ispitivanja daje upotreba poliuretanske pjene gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm.

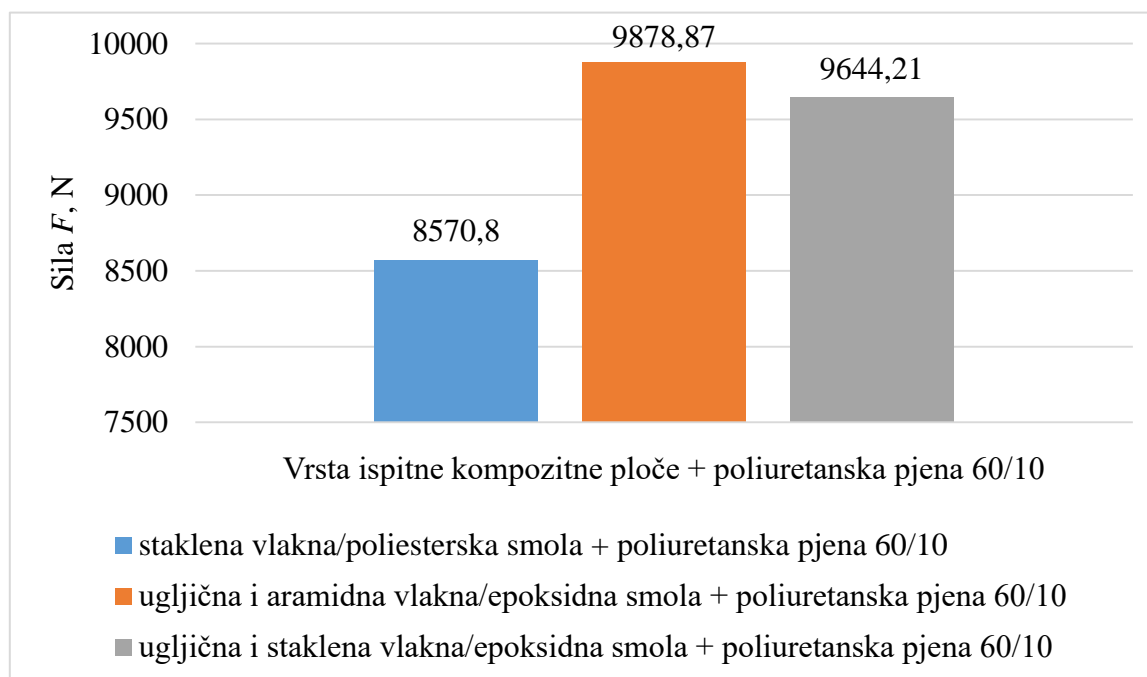
Slika 6.27 prikazuje usporedbu rezultata ispitane sile F za sve tri vrste ispitnih kompozitnih ploča s upotrebom poliuretanske pjene gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm . Sa slike se može zaključiti da prva ispitna ploča od staklenih vlakana i poliesterske smole ima najnižu silu $F = 5143,19 \text{ N}$, odnosno da druga ispitna ploča od ugljičnih i aramidnih vlakana, te epoksidne smole ima najvišu silu $F = 6640,39 \text{ N}$. Usporedbom slika 6.26 i 6.27 može se zaključiti da upotreba poliuretanske pjene doprinosi smanjenju sile F . S obzirom na sve to može se zaključiti da se upotrebom prve vrste kompozitne tvorevine i poliuretanske pjene gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm može postići najniža sila F . Cijena materijala za izradu ovakve kompozitne tvorevine i izradu poliuretanske pjene povoljnija je nego za izradu treće vrste kompozitne tvorevine bez upotrebe pjene. Razlog tome je niža cijena staklenih vlakana i poliesterske smole. Na temelju toga može se zaključiti da se upotrebom prve vrste kompozitne tvorevine i poliuretanske pjene gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm može postići i niža sila F , ali i niža cijena izrade u odnosu na upotrebu treće vrste kompozitne tvorevine bez poliuretanske pjene. S obzirom na to može se zaključiti da kompozitna tvorevina od staklenih vlakana i poliesterske smole, te poliuretanske pjene gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm ima potencijala za izradu prednjeg branika automobila.



Slika 6.27. Usporedba rezultata sile F ispitnih na pločama s upotrebom poliuretanske pjene gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm

Na temelju izmjerenih masa ispitnih kompozitnih ploča, koje su prikazane u tablici 6.5, može se zaključiti da je prva ispitna ploča od staklenih vlakana i poliesterske smole najteža s masom od $m = 351,96$ kg, dok je treća ispitna ploča od ugljičnih i staklenih vlakana, te epoksidne smole ima masu od $m = 295,63$ kg. S obzirom na to može se zaključiti da pri odabiru vrste kompozitne tvorevine za izradu automobilskeg branika treba napraviti kompromis, odnosno odlučiti dali nam je bitna bolja apsorpcija udara ili manja masa branika.

Kako se u automobilskej industriji teži što nižoj masi vozila, može se zapitati kakve rezultate daje upotreba poliuretanske pjene najniže gustoće i naniže debljine. Slika 6.28 prikazuje usporedbu rezultata ispitane sile F za sve tri vrste ispitnih kompozitnih ploča s upotrebom poliuretanske pjene gustoće 60 kg/m^3 i debljine 10 mm. Na slici 6.28 može se vidjeti da prva ispitna ploča od staklenih vlakana i poliesterske smole ima najnižu silu $F = 8570,8$ N, odnosno da druga ispitna ploča od ugljičnih i aramidnih vlakana, te epoksidne smole ima najvišu silu $F = 9878,87$ N. Na temelju toga može se zaključiti da se upotrebom poliuretanske pjene gustoće 60 kg/m^3 i debljine 10 mm i prve vrste kompozitne tvorevine može ostvariti najniža sila F , ali i najniža cijena izrade. Uspoređujući rezultate sa slike 6.27 i 6.28 može se potvrditi da poliuretanska pjene veće gustoće i veće debljine daje nanižu silu F .



Slika 6.28. Usporedba rezultata sile F ispitnih na pločama s upotrebom poliuretanske pjene gustoće 60 kg/m^3 i debljine 10 mm

Iz ovih dobivenih rezultat druga kompozitna ploča s ugljičnim i aramidnim vlaknima, te epoksidnom smolom pokazala je najlošije rezultate. Zbog toga se ona ne preporučuje za daljnja ispitivanja u automobilske industriji, u ovom slučaju za kompozitni automobilski branik.

Sva daljnja istraživanja treba provoditi na pločama od staklenih vlakana ili kombinacije staklenih vlakana i ugljičnih vlakana, no treba imati na umu da prema literaturi [26] udar mora biti u staklena vlakna jer pokazuju bolju apsorpciju energije udara, ili ispitati nove kombinacije vlakana.

7. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali danas se sve više razvijaju i primjenjuju u različitim industrijama zbog svojih mnogobrojnih prednosti. Posljednjih godina upotreba polimernih kompozita u automobilske industriji u stalnom je porastu. Polimerni kompoziti imaju uz dobra mehanička svojstva i malu masu što pozitivno utječe na ukupno smanjenje mase vozila i bolju iskoristivost goriva.

Automobilski branik ima važnu ulogu pri naletu automobila na neku prepreku (drugo vozilo, stup, ograda) ili pješaka zbog toga što mora apsorbirati energiju udara kako ne bi došlo do oštećenja ostalih dijelova automobila, putnika i pješaka. Konvencionalni materijali za izradu automobilske branike su čelik i aluminij, a zbog potrebe za lakšom konstrukcijom mogu se zamijeniti polimernim kompozitima ojačanim vlaknima uz dodatak polimernog materijala za dodatnu apsorpciju udara.

Ispitivanje sile udarca na različite vrste ispitnih kompozitnih ploča bez upotrebe poliuretanske pjene dalo je najbolje rezultate za hibridnu kompozitnu ploču izrađenu od ugljičnih i staklenih vlakana, te epoksidne smole. Primjenom dodatnog apsorbirajućeg materijala u obliku poliuretanske pjene različitih gustoća i debljina postiže se znatno bolja apsorpcija udarca. Analiza rezultat ispitivanja pokazala je da debljina poliuretanske pjene predstavlja značajan faktor koji utječe na smanjenje sile udarca. Najmanja sila udarca, odnosno najbolja apsorpcija energije udara postiže se primjenom poliuretanske pjene gustoće 100 kg/m^3 i debljine 20 mm i to u kombinaciji s ispitnom pločom izrađenom od staklenih vlakana i poliesterske smole.

Na temelju rezultata može se zaključiti da se poliuretanska pjena može upotrijebiti kao dodatni apsorbirajući materijal u sustavu automobilske branike zbog svoje male mase te odlične apsorpcije udarne energije. Primjena poliuretanske pjene u kombinaciji s kompozitnom tvorevinom izrađenom izravnim prešanjem od staklenih vlakana i poliesterske smole postiže se najmanja sila udarca, ali i najniža cijena materijala koji su potrebni za izradu. Zbog svega navedenog može se zaključiti da su ovi materijali potencijalno iskoristivi za izradu sustava automobilske branike.

Važno je naglasiti da su kombinacije različitih vrsta vlakana, smola i polimernih pjena mnogobrojne, te da ovaj rad predstavlja preliminarno ispitivanje na temelju kojeg se mogu raditi daljnja istraživanja i ispitivanja.

8. LITERATURA

- [1] Špoljar, M.: Ispitivanje kompozitnih tvorevina za primjenu u automobilskoj industriji, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2016.
- [2] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011.
- [3] Lončar, A., Vojvodić, D., Komar, D.: Vlaknima ojačani polimeri - Prvi dio: Osnove i problematika izgradnje, *Acta Stomatol Croat.* 2006; 40: 72-82
- [4] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2012.
- [5] Petruša, J.: Polimerni kompoziti za oplatu natjecateljskih motocikala, završni rad, FSB, Zagreb, 2016.
- [6] Prabhakaran, S., Chinnarasu, K., Senthil Kumar, M.: Design and Fabrication of Composite Bumper for Light Passenger Vehicles, *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 2, no. 4, pp. 2552-2556, 2012.
- [7] Davoodi, M., Sapuan, S., Ahmad, D., Ali, A., Khalina, A., Jonoobi, M.: Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam, *Materials & Design*, vol. 31, no. 10, pp. 4927-4932, 2010.
- [8] Savage, G. M.: *Metals and materials* 7, 10 617 (1991.)
- [9] Savage, G. M.: *Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing*, 2008.
- [10] American Chemistry Matters; Plastics and composites are reshaping car design, IHS report shows, 2017. <https://blog.americanchemistry.com/2014/11/plastics-and-composites-are-reshaping-car-design-ihs-report-shows/> , 14.6.2017.
- [11] Ramyasree, L., Venkataramaniah, D., Naveen Kumar, G.: Impact Analysis of Frontal Car Bumper using Long Fibre Reinforced Thermoplastics, *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 5, no. 3, pp., 2015.
- [12] Crandall, J.: Designing road vehicles for pedestrian protection, *BMJ*, vol. 324, no. 7346, pp. 1145-1148, 2002.
- [13] Svoboda, J., Cizek, V.: Pedestrian - Vehicle Collision: Vehicle Design Analysis, SAE Technical Paper 2003-01-0896, 2003., doi:10.4271/2003-01-0896.
- [14] "Dnevnik.hr - Stradalih je manje, ali Hrvatska ne stoji dobro", Dnevnik.hr, 2017. <http://dnevnik.hr/vijesti/hrvatska/broj-poginulih-u-nesrecama-na-cestama-prepolovio-se-u-posljednjih-20-godina-u-eu---457697.html> , 14.6.2017.

- [15] "Eurostat - Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) table", Ec.europa.eu, 2017. <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsdr420&plugin=1> , 14.6.2017.
- [16] Davoodi, M., Sapuan, S., Yunus, R.: Conceptual design of a polymer composite automotive bumper energy absorber, *Materials & Design*, vol. 29, no. 7, pp. 1447-1452, 2008.
- [17] Abvabi, A., Nasr, A., Noorpoor, A., Kiasat, M.: Lower extremity injuries in vehicle-pedestrian collisions using a legform impactor model, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, vol. 11, no. 2, pp. 97-105, 2010.
- [18] Kleisner, V., Zemčík, R.: Analysis of Composite Car Bumper Reinforcement, *Applied and Computational Mechanics*, vol. 3, pp. 287-296, 2009.
- [19] Motgi, N. S., Naik, S. B., Kulkarni, P. R.: Impact Analysis of Front Bumper, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 6, no. 5, 2013.
- [20] Steel Market Development Institute, *Steel Bumper Systems for Passenger Cars and Light Trucks*, Fifth Edition, May 2013.
- [21] Writer, G., Writer, S., Writer, S., Andersson, T., Andersson, T., Writer, G.: Lifetime Warranty Coverage for Radiator, Bumper Fascia Parts: GM Repair Insights, Gmrepairinsights.com, 2017. <https://gmrepairinsights.com/2014/04/lifetime-warranty-coverage-for-radiator-bumper-fascia-parts/> , 14.6.2017.
- [22] Obradovic, J., Boria S. Belingardi, G.: Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures, *Composite Structures*, vol. 94, no. 2, pp. 423-430, 2012.
- [23] "Aluminium Bumper Impact Beam Product details - View Aluminium Bumper Impact Beam from Kyungnam Metal Co., Ltd. on EC21.com", Almac.en.ec21.com, 2017. http://almac.en.ec21.com/Aluminium_Bumper_Impact_Beam--4786086_4786102.html , 14.6.2017.
- [24] Sapuan, S., Maleque, M., Hameedullah, M., Suddin, M., Ismail, N.: A note on the conceptual design of polymeric composite automotive bumper system, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, no. 2, pp. 145-151, 2005.
- [25] "How To Read The Stars | Euro NCAP", Euroncap.com, 2017. <http://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/> , 16.6.2017.

- [26] Song, J.: Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers, *Composites Part B: Engineering*, vol. 79, pp. 61-66, 2015.
- [27] Tomašić, D., Ilinčić, P., Pilipović, A.: Influence of layers lay-up on the mechanical properties of hybrid composites in field of aeronautics. *Polimeri: časopis za plastiku i gumu*, 36(1-2), 5-10. 2015. Preuzeto s <http://hrcak.srce.hr/161317> , 26.6.2017.
- [28] Swolfs, Y., Gorbatikh, L., Verpoest, I.: Fibre hybridisation in polymer composites: A review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 67(2014), 181-200.
- [29] Marić, G.: *Materijali II*, predavanja FSB, Zagreb, 2013.
- [30] Raos, P., Šercer, M.: *Teorijske osnove proizvodnje polimernih tvorevina*, Strojarski fakultet Slavonski brod, Slavonski Brod/Zagreb, 2010.
- [31] Čatić, I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, DPG, Zagreb 2006.
- [32] Kelteks.hr, "Kelteks proizvodnja - distribucija | Program distribucije | Kelteks d.o.o. Karlovac", 2017 http://www.kelteks.hr/sadrzaj_graditeljstvo.php?gs=32&s=30 , 16.6.2017.
- [33] Kompozit-kemija.hr, "Kompozit kemija – epoksid, karbonska vlakna, kompoziti", 2017. <http://kompozit-kemija.hr/portfolio-posts/karbonska-vlakna> , 16.6.2017.
- [34] Magdalenić Bujanić, J., Bujanić, B.: Aramidna vlakna, *Polimeri* 32 3 - 4: 130 – 134, 2012.
- [35] Dupont.com, "Kevlar® Fiber | DuPont | DuPont USA", 2017 <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html> , 16.6.2017.
- [36] Pilipović, A., *Proizvodnja kompozitnih tvorevina*, predavanja FSB, Zagreb, 2015.
- [37] "Technology update: compression moulding", *Reinforced Plastics*, vol. 47, no. 7, pp. 20-21, 2003.
- [38] "File:Wet compression moulding.png - Wikimedia Commons", Commons.wikimedia.org, 2017. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wet_compression_moulding.png , 30.5.2017.
- [39] Filetin, T.: *Napredni tehnologije materijala, Postupci proizvodnje kompozita*, predavanja FSB, Zagreb, 2015.

- [40] "Sheet Moulding Compound - Tricel Ireland", Tricel Ireland, 2017. <http://ie.tricel.eu/sheet-moulding-compound/> , 30.5.2017.
- [41] "classic glass-mat-reinforced thermoplastics, semi-finished, panel, automotive, 3D structural components, polypropylene, impact resistant, benign crash behavior, moisture resistant, chemical resistant, polyamide, thermoplastic polyester, energy absorption - Quadrant", Quadrantplastics.com, 2017. <http://www.quadrantplastics.com/eu-en/products/composite-material/gmt.html> , 30.5.2017.
- [42] Petek, D.: Ispitivanje kompozitnih tvorevina za primjenu u automobilske industriji, završni rad, FSB/TVZ, Zagreb, 2016.
- [43] Herceg, D.: Osobine kompozitnih materijala sa polimernom matricom ojačanom staklenim vlaknima, diplomski rad, Mašinski fakultet Sarajevo, 2017.
- [44] Ilinčić, P., Špoljar, M., Pilipović, A.: Comparison of the Hybrid Composites Production Processes for Application in the Automotive Industry, CIM 2017 Computer Integrated Manufacturing and High Speed Machining / Abele, Eberhard; Udiljak, Toma; Ciglar, Damir - Zagreb: Croatian Association of Production Engineering, 2017, 115-122.
- [45] Kompozit-kemija.hr, "Kompozit kemija - epoksid, karbonska vlakna, kompoziti", 2017. <http://kompozit-kemija.hr/portfolio-posts/katalizatori> , 3.7.2017.
- [46] Belingardi, G., Beyene, A., Koricho, E. and Martorana B.: Alternative lightweight materials and component manufacturing technologies for vehicle frontal bumper beam, Composite Structures, vol. 120, pp. 483-495, 2015.
- [47] Maček, M.: Utjecaj pjene na apsorpciju udarca u balističkim kacigama, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2013.
- [48] Pilipović, A.: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa, FSB, Zagreb, 2012.
- [49] Rujnić-Sokele, M.: Utjecaj parametara razvlačnog puhanja na svojstva PET boca, Polimeri, 28(2007)4, 225-233.

9. PRILOZI

I. CD-R disk

I I. Rezultati ispitivanja

Tablica 9.1 Rezultati ispitivanja: Staklena vlakna/poliesterska smola + poliuretanska pjena

Tablica 9.2 Rezultati ispitivanja: Ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena

Tablica 9.3 Rezultati ispitivanja: Ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena

Tablica 9.4 Rezultati ispitivanja: Staklena vlakna/poliesterska smola + poliuretanska pjena

Tablica 9.5 Rezultati ispitivanja: Ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena

Tablica 9.6 Rezultati ispitivanja: Ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena

I I. Rezultati ispitivanja

Tablica 9.1. Rezultati ispitivanja: Staklena vlakna/poliesterska smola + poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena gustoća/debljina kg/m ³ / mm	Staklena vlakna/poliesterska smola + poliuretanska pjena							
	80/15	60/20	80/15	60/10	80/15	100/20	100/10	-
Redni broj mjerjenja	1	2	3	4	5	6	7	8
Masa m , kg	700,8	561	742,8	874,8	764	486	850	1010
	734,4	558	699,2	844,2	772,5	538,2	836	982,5
	747,5	571,2	700,3	875	692	516	748,8	912
	767	525	684	866	741	547,2	806,4	984
	756,9	513	768,6	908,4	676,2	534	833,4	1015,5
Srednja vrijednost mase \bar{x} , kg	741,32	545,64	719,06	873,68	729,14	524,28	814,92	980,8
Standardna devijacija, S	25,64	25,17	35,28	23,11	43,06	24,23	40,19	41,24

Tablica 9.2. Rezultati ispitivanja: Ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena gustoća/debljina kg/m ³ / mm	Ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena							
	80/15	60/20	80/15	60/10	80/15	100/20	100/10	-
Redni broj mjerjenja	1	2	3	4	5	6	7	8
Masa m , kg	904,2	668	888,6	996	826,8	684,6	960,5	956
	886,8	691,2	888	1002	831	664,8	961,2	996
	901,8	688	695,8	1011,5	835	679,5	950,4	978
	872,4	670,2	876	996,6	841,2	682,5	933,6	982
	854,4	718	852	1029	822	673,1	958,8	952
Srednja vrijednost mase \bar{x} , kg	883,92	687,08	840,08	1007,02	831,2	676,9	952,9	972,8
Standardna devijacija, S	20,88	20,14	82,01	13,77	7,39	8,04	11,62	18,47

Tablica 9.3. Rezultati ispitivanja: Ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena gustoća/debljina kg/m ³ / mm	Ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena							
	80/15	60/20	80/15	60/10	80/15	100/20	100/10	-
Redni broj mjerjenja	1	2	3	4	5	6	7	8
Masa m , kg	879	625,1	875	990	868,2	667	976,5	958,8
	826,6	679,2	890	987	871,2	645,6	980	949
	855,6	675,5	908,6	978	866,4	657	967,2	944,2
	873	669	889	992,1	867	630	977,4	960
	862	666,5	895,5	968,4	862,2	650,4	982,8	937,8
Srednja vrijednost mase \bar{x} , kg	859,64	663,06	891,61	983,1	867	650	976,78	949,96
Standardna devijacija, S	19,61	21,81	12,14	9,82	3,26	13,76	5,89	9,50

Tablica 9.4. Rezultati ispitivanja: Staklena vlakna/poliesterska smola + poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena gustoća/debljina kg/m ³ / mm	Staklena vlakna/poliesterska smola + poliuretanska pjena							
	80/15	60/20	80/15	60/10	80/15	100/20	100/10	-
Redni broj mjerjenja	1	2	3*	4	5	6	7	8
Sila F , N	6874,85	5503,41	7286,87	8581,79	7494,84	4767,66	8338,5	9908,1
	7204,46	5473,98	6863,08	8281,60	7578,23	5279,74	8201,16	9638,33
	7332,98	5603,47	6869,94	8583,75	6788,52	5061,96	7345,73	8946,72
	7524,27	5150,25	6710,04	8495,46	7269,21	5368,03	7910,78	9653,04
	7425,19	5032,53	7539,97	8911,40	6633,52	5238,54	8175,65	9962,06
Srednja vrijednost sile \bar{x} , N	7272,35	5352,73	7053,98	8570,80	7152,86	5143,19	7994,37	9621,65
Standardna devijacija, S	251,55	246,88	346,06	226,72	422,46	237,65	394,26	404,58

* Isključeno iz analize zbog prevelikog odstupanja od ostalih središnjih točaka (redni broj mjerjenja 1. i 5.).

Tablica 9.5. Rezultati ispitivanja: Ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena gustoća/debljina kg/m ³ / mm	Ugljična i aramidna vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena							
	80/15	60/20	80/15	60/10	80/15	100/20	100/10	-
Redni broj mjerenja	1	2	3	4	5	6	7	8
Sila F , N	8870,20	6553,08	8717,17	9770,76	8110,91	6715,93	9422,51	9378,36
	8699,51	6780,67	8711,28	9829,62	8152,11	6521,69	9429,37	9770,76
	8846,66	6749,28	6825,80 **	9922,82	8191,35	6665,90	9323,42	9594,18
	8558,24	6574,66	8593,56	9776,65	8252,17	6695,33	9158,62	9633,42
	8381,66	7043,58	8358,12	10094,49	8063,82 **	6603,11	9405,83	9339,12
Srednja vrijednost sile \bar{x} , N	8671,26	6740,25	8241,18	9878,87	8154,07	6640,39	9347,95	9543,17
Standardna devijacija, S	204,80	197,60	167,89	135,08	60,12	78,83	114,0	181,21

** Odbačen rezultat ispitivanja jer odstupa od ostalih rezultata ispitivanja.

Tablica 9.6. Rezultati ispitivanja: Ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena gustoća/debljina kg/m ³ / mm	Ugljična i staklena vlakna/epoksidna smola + poliuretanska pjena							
	80/15	60/20	80/15	60/10	80/15	100/20	100/10	-
Redni broj mjerjenja	1	2	3	4	5	6	7	8
Sila F , N	8622,99	6132,23	8583,75	9711,9	8517,04	6543,27	9579,47	9405,83
	8128,57	6662,95	8730,9	9682,47	8546,47	6333,34	9613,8	9309,69
	8393,44	6626,66	8913,37	9594,18	8499,38	6445,17	9488,23	9262,60
	8564,13	6562,89	8721,09	9732,50	8505,27	6180,3	9588,29	9417,6
	8456,22	6538,37	8784,86	9500,0	8458,18	6380,42	9641,29	9199,82
Srednja vrijednost sile \bar{x} , N	8433,07	6504,62	8746,79	9644,21	8505,27	6376,5	9582,21	9319,11
Standardna devijacija, S	192,41	214,0	119,05	96,36	31,97	135,0	57,80	93,18